



TITLE:

運転意図の推移を考慮した車両挙動解析に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

柳原, 正実

CITATION:

柳原, 正実. 運転意図の推移を考慮した車両挙動解析に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18254>

RIGHT:

許諾条件により本文は2015-03-01に公開

運転意図の推移を考慮した 車両挙動解析に関する研究

2014 年

柳原 正実

序

これまで、交通流を構成する基本単位である個々の車両挙動に関して、ドライバーの思考・判断をまでを定量的に分析した例は少ない。しかし、個々の車両挙動はドライバーの思考や判断の結果、運転操作を介して実現していることを考慮すると、渋滞や事故の原因が個々のドライバーの心理面に依存している可能性も否定できない。本研究では、ドライバーが運転について考えていることを運転意図と呼び、この運転意図という新たな視点を考慮した車両挙動解析の有用性を示す。

従来、個々の車両が相互に影響し合う作用の解析のために多くの車両挙動モデルが提案されてきているが、既存のモデルや分析手法の多くは、単純な追従走行・車線変更時のギャップ選択、線形の違いの考慮等、特定の状況を想定した研究が多く、実際の車両挙動自体も様々な段階・様相が複合された点を十分に表現しきれていない。本研究では、車両挙動における複数の段階・様相の違いが、運転意図に大きく影響しているものと仮定している。例えば、前方の車両が急に接近してきた場合には、ドライバーは「ブレーキをかけて安全を確保しよう」という意図を持ち、車両は急減速すると考えられる。また、車線変更に関しても「車線変更に備えて減速しよう」「今からハンドルを切って車線を越えていこう」といった段階的な運転意図をドライバーが持っており、車両挙動もそれぞれ対応したものとなると想定している。この運転意図とその推移構造を考慮し、車線変更挙動と様々な加減速挙動を統合した車両挙動モデルを本研究の中で構築する。加えて、運転後のドライバーへインタビューを行うことによって、実際にどのような運転意図をもっていたのかを明らかにする。この表明された運転意図と、モデルを用いて推定された運転意図、車両挙動とを合わせて分析することで、モデルの構造の妥当性を示し、運転意図を考慮することの有用性について言及する。

本研究における成果は、ドライバーの思考と渋滞や事故との関係を明らかにするために有用な知見であるといえる。運転意図を用いることによって、渋滞や事故の要因となりうるドライバーの思考・行動パターンが解明され、その対策の検討が可能になると期待される。

目次

1. 序論	1
1.1. 背景	1
1.2. 研究の目的	3
1.3. 論文構成	4
1.3.1. 論文を通して使用する単語の定義	4
1.3.2. 各章の関連	5
2. 既存の車両挙動モデルの整理	7
2.1. はじめに	7
2.2. 加減速挙動	7
2.3. 車線変更挙動	9
2.4. 加減速挙動と車線変更挙動	11
2.5. 統合型車両走行モデル	12
2.6. まとめ	15
3. 運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデル	23
3.1. はじめに ～運転意図とは～	23
3.2. 既存モデルを統合した車両挙動モデルの考察	23
3.3. 運転意図と車両挙動に関する考察	25
3.4. 運転意図の推移に関する考察	28
3.5. 運転意図推移に基づいた統合型車両挙動モデルの枠組み	28
3.6. 運転意図推移構造における車線推移の表現	31
3.7. 運転意図推移構造の例	33
3.7.1. 単路部における追従走行	33

3.7.2. 車線変更を含む高速道路における走行全般	34
3.8. 定式化	37
3.8.1. 表記について	37
3.8.2. 運転意図推移統合型車両挙動モデルの定式化	40
3.8.3. 尤度関数の定義式	48
3.8.4. 尤度関数の HMM との比較	50
3.8.5. 尤度関数の計算式	51
3.9. 既存モデルとの比較	53
3.10. まとめ	55
4. 運転意図推移統合型車両挙動モデルのパラメータ推定	59
4.1. はじめに	59
4.2. 運転意図推移統合型車両挙動モデルパラメータ推定手法	59
4.3. 推定用車両軌跡データ	62
4.3.1. 車両軌跡データの概要	62
4.3.2. 車両位置・走行状態・周辺車両の定義	63
4.3.3. 推定用車両軌跡の抽出	66
4.3.4. 推定時間	69
4.4. 推定結果	69
4.4.1. 比較対象の単純モデル	69
4.4.2. 追従走行のみを扱った運転意図推移構造	70
4.4.3. 車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造	75
4.5. まとめ	86
5. 運転意図と車両挙動との関係の実証的分析	89
5.1. はじめに	89
5.2. 既存のドライバーの意図の分析手法	89

5.3. 実験概要	90
5.3.1. DS 走行実験概要	90
5.3.2. インタビュー調査概要	96
5.4. 表明運転意図の分類	97
5.4.1. インタビューの回答内容	97
5.4.2. インタビュー回答の数値化	97
5.4.3. 階層クラスタリングによる表明運転意図の分類	100
5.5. 表明運転意図と道路線形・走行条件との関係	103
5.5.1. 表明運転意図の空間的变化	103
5.5.2. 表明運転意図観測数の年代別比較	109
5.6. 表明運転意図と車両挙動との関係	111
5.6.1. 表明運転意図と車両挙動に関する統計値との関係	111
5.6.2. 表明運転意図と加速度との関係	118
5.7. 表明運転意図の推移	121
5.8. まとめ	123
6. 運転意図の推移に基づく情報提供効果分析	127
6.1. はじめに	127
6.2. 情報提供下における表明運転意図推移の把握方法	127
6.3. 情報提供と表明運転意図推移の関係	132
6.3.1. 分析区間	132
6.3.2. 情報提供の種類による相違点	132
6.3.3. 情報提供が適切に行われなかった場合との相違点	135
6.4. 表明運転意図推移と車両挙動との関係	138
6.4.1. 表明運転意図推移地点別にみた車両挙動	138
6.4.2. 表明運転意図推移地点と情報提供下の速度変化	141
6.4.3. 表明運転意図推移地点と合流時の最大減速度	142

6.5. 情報提供ダミー変数を導入した運転意図推移統合型車両挙動モデル	144
6.5.1. モデルの概要	144
6.5.2. モデルパラメータ推定結果	145
6.5.3. 各地点における推定運転意図の取得数	149
6.6. まとめ	152
7. 結論	155
7.1. 結論	155
7.2. 課題と展望	156

1. 序論

1.1. 背景

近年、技術の進歩はますます進み、その恩恵は自動車の運転方法にも変化をもたらしつつある。そして、自動運転という言葉を多く耳にするようになった。以前から、オートクルーズコントロールや自動ブレーキシステムを搭載した車種は複数存在していたが、さらに技術の段階が進みつつあるといえよう。また、車載器や車道に設置された情報版も年々高度なものとなっており、多くの高度な情報が、運転中にリアルタイムで得られるようになってきている。これらの技術は、ドライバーのより安心、安全な運転を支援している。

しかし、運転を支援する技術や自動運転を技術の進歩に任せて普及させるだけでは、より快適で安全な運転を実現することは困難なのではないだろうか。運転を支援する技術やリアルタイムの情報がいかに高度なものであったとしても、最終的に車両を運転するのは人である。自動運転がいかに普及しても、急いでいる場合、狭い通路等に進入していく場合等、搭乗者の要求を完全に満たした走行を行うことは技術的に相当困難であるため、全く人が運転しなくなるとは考えにくい。そのため、人がどのような意図をもって運転しているのかを理解したうえで、技術と人それぞれが不足分を補えるような運転体系を実現していくべきであろう。

自動車交通の利便性を最も損なう要因の一つに交通事故がある。技術の進歩が真っ先に改善する対象とするであろう交通事故は、多くの車両に運転支援システムが導入されるようになった現在においても、未だ年間数千人が自動車事故の犠牲となっている。それでも、図 1.1 に示すように、近年は事故の死者数は減少しており、自動車が事故時にもたらす被害を軽減する技術が進歩してきていることがうかがえる。一方で、事故件数は死者数ほど減少しているとは言えず、事故に至る危険性の抑制は、進歩した技術が未だ十分貢献できていない分野であるといえる。その理由としては、ヒューマンエラーが事故につながるといわれていることから推察されるように、人がどのような意図をもって運転しているのかについて体系的な知見が不足している可能性がある。そのために、どのような技術が最も効果的に安全運転に貢献できるのかがわかっていないのではないだろうか。

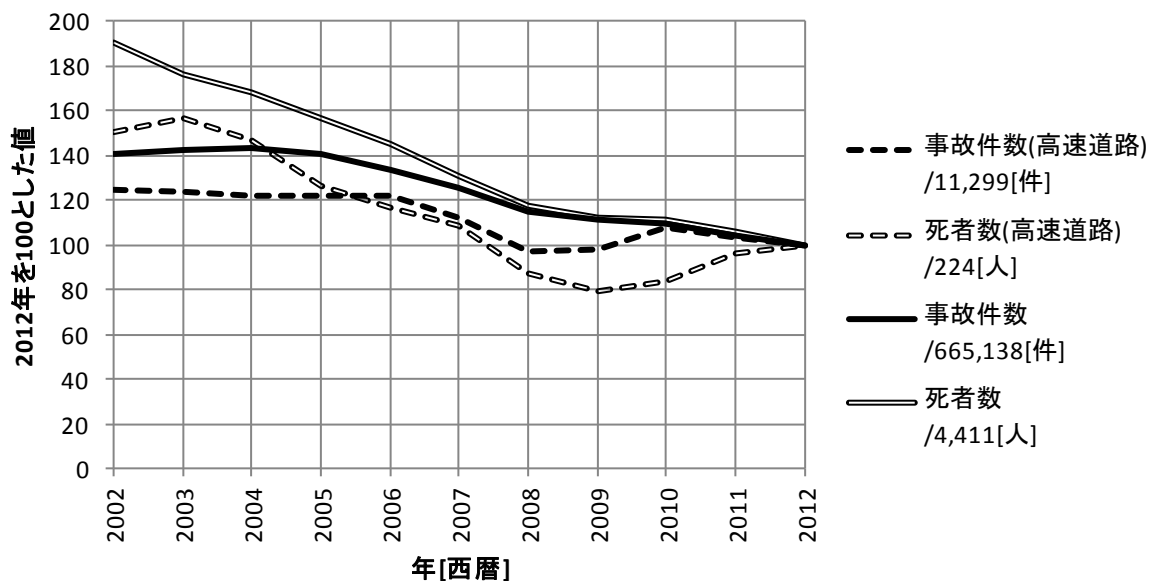


図 1.1 事故件数と死者数推移（凡例中に 2012 年の値を示す）

（警察庁調べ）

また、高速道路での事故は渋滞を誘発することも多い。高速道路での渋滞は短時間で輸送を行えるという利便性を大きく損なうため、利便性を維持するための多数のアプローチが存在する。特に合流区間やその前後の区間といった、車線変更や合流等、複数の車線を跨ぐ車両挙動が多頻度で発生している区間では、多くの渋滞や事故が観測されており、その抑制策の立案・評価・実施は重要な学術的かつ実務的な課題といえる。しかし、当該区間の車両挙動は車線を跨ぎ、かつ、複数車両が関与するゆえに複雑なものであり、いくつかの渋滞や事故に対する対策を評価・検討する場合を想定すると、渋滞・事故が発生するメカニズムは十分に解明されているとは必ずしもいえない。

車線を跨ぐ車両挙動が多頻度で発生している区間では、均質な交通流を仮定した理論を適用することが難しいため、渋滞・事故が発生するメカニズムを解明するためには、個々の自動車を運転しているドライバーの運転行動から理解する必要がある。ただし、ドライバーの運転行動の理解にも様々な側面・方法論が考えられ、すべてが自動車交通の危険性を減らすために有用なものとはならない。個々のドライバーが行う多様な運転行動も、部分的に取り出して解析すれば、ある程度の規則性があるが、それを見出すだけでは、役に立たない。何らかの事故や渋滞に対する策の考慮に役立てるためには、その規則性に意味を見出して、どの要素が事故や渋滞を引き起こす状況を導くのかを知る必要がある。また、一連の運転行動全体に関して、未知の状況下でドライバーがどのように行動するかについて推測できなければならない。そのためにはドライバーが様々な状況下でどのように判断し、行動に移すのかを理解しておく必要がある。ドライバーがどのような意図をもって運転しているのかが分かれば、事故や渋滞の要因を特定する役に立つ可能性が高い。

ドライバーの行動の結果である車両挙動を解析する方法として、車両軌跡や走行ログ等の、個々の車両挙動に関する情報から、有用な知見を導くという方法が考えられる。しかし、位置や速度、加速度、周辺車両との相対距離等を集計して得られる知見には限界がある。時々刻々の車両挙動に関する膨大な情報には、位置や速度、加速度間の相関、時系列に沿った相関等が混在し、別の有用な知見が得られる可能性がある。その知見を抽出するための手法の一つとして、理論的な車両挙動モデルを構築し、解析に応用するという手法が存在する。パラメトリックな数理モデルのパラメータ推定をあるデータを用いて行う場合、そのモデルで仮定している構造が説明している内容に関する情報を推定結果として適用対象のデータから抽出できるという利点がある。そのため、ドライバーの運転に対する意図を扱う車両挙動モデルを応用することによって、ドライバーの意図に関する情報を車両挙動から抽出できる可能性がある。

1.2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、ドライバーの運転に対する意図を考慮しつつ一連の車両挙動全体を表現する統一的なモデルを構築し、車両解析に応用することで、高速道路等における渋滞・事故が発生するメカニズムの解明に貢献しようと考えている。さらに、構築する車両挙動モデルに関しては、従来の車両挙動モデルを踏襲しつつ、より精緻な交通現象の解析・推定を可能な構造を持ち、車両挙動全体が表現可能なものにすることを目指している。

車両挙動全体が表現可能なモデルを構築する上で問題となるのは、既存のモデルや分析手法の多くが、単純な追従走行・車線変更時のギャップ選択、線形の違いの考慮等、特定の状況を想定したものが多いため、それらの特定の状況のみを対象としたモデルを統合する必要があるということである。また、統合される側の複数存在するモデルに関して、いつ、いかなる場合にどのモデルを適用することが妥当であるかという問題も解決しなければならない。この問題の解決の糸口として、本研究では、ドライバーの心理構造に着目した。具体的には、ドライバーは時々刻々の道路状況に応じて、「〇〇しよう」という意図を形成していると考えられ、その意図の変化と車両挙動とを結びつけることで、多数のモデルを統合した車両挙動全体を表現するモデルを構築可能にする。

本論文では、従来のモデリング手法よりも精度が高く、ドライバーの意図を扱う車両挙動モデリングの枠組みを構築することを第一の目的としている。

その実現のために、ドライバーの運転時の思考過程を考慮したモデル構造と、精密な車両軌跡を用いたモデルパラメータの推定手法を新たに構築する。モデルパラメータの推定に用いる精密な車両軌跡のデータ等は現状では取得が困難な場合も多いが、昨今のデータ取得技術を鑑みるに、近い将来において、車両相互の影響が評価可能な車両軌跡は容易に取得可能になると予想される。例えば現在、自動車の自動運転に注目が集まっており、も

はやその実現は夢の話ではなくなっている。自動運転技術には、車両間の距離の随時測定し、道路線形と自車位置情報を常に把握しておく仕組みが必要不可欠であり、共にミリ波レーダーやGPSを応用した技術によってほぼ実現されている。この技術によって取得される前方車両との位置関係等のデータは、本研究で構築するモデルパラメータ推定手法に必要なデータそのものであるため、先に述べた予想が大きく外れることはないであろう。また、構築するモデルは現在のシミュレーション中で利用されているモデルの欠点を補うものでもある。ここで考えている欠点とは、シミュレーション中のモデルがブラックボックス化している問題やモデルの挙動が一般化されすぎているという欠点であり、このモデルは将来的にシミュレーションの信頼性や精度向上にも貢献できるものであると考えられる。

また、本論文で構築する車両挙動モデルは、本研究で運転意図と呼ぶ、ドライバーの運転に関する心理的な状態とその変化をある程度推定できるという特徴を併せ持つ。これは、モデルが「異なる車両挙動は異なる運転意図によって導かれる」「運転意図は周囲の状況変化に合わせて時間的に変化する」という仮定に基づいて構築されているためである。この仮定が正しければ、モデル中で扱っている運転意図を様々な対策の検討へと活用することができる。よって、インタビュー調査をもとに取得した運転意図と車両挙動との関係から、モデルの仮定の検証を行いモデルの構造の妥当性を示す。その上で、安全走行支援情報の提供を行った場合の運転意図の変化と安全性の関係を示す知見を得ることによって、運転意図が情報提供効果の分析に有用であることを示す。

そして、上述した運転意図という新たな視点を考慮した車両挙動解析の有用性を示すことを本研究の第二の目的としている。

1.3. 論文構成

1.3.1. 論文を通して使用する単語の定義

本論文では「運転意図」について複数の視点から考察を加えている。この「運転意図」は、ドライバーが運転中に「どのような運転をするか」について考えていること、言い換えると、ドライバーが運転に対して持っている意図を表す単語として本論文全体で用いる。

また、第3章で構築するモデルは、運転意図の推移を仮定した構造を持ち、車両挙動データを用いたモデルパラメータ推定を通して、運転意図の推定が可能である。この推定された運転意図を「推定運転意図」と呼ぶ。さらに、第5章では、インタビュー調査によってドライバーに運転意図を表明させており、インタビューの回答を集約して得られた運転意図を「表明運転意図」と呼んでいる。これら「推定運転意図」と「表明運転意図」は、取得することが困難である実際の「運転意図」を、それぞれの方法によって抽出したものを表す単語として、運転意図同様、本論文全体を通して用いる。

加えて、本研究では、第3章で構築する「運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデル」の略称として、「運転意図推移統合型車両挙動モデル」という単語を用いている。当該モデルは、本研究において「古典的な追従モデル」と呼ぶ、第2章で詳述する、加速度が感度パラメータと入力の積によって算出される構造を持つモデルを複数含有する構造を持つ。

1.3.2. 各章の関連

本論文では、一連の車両挙動全体を表現する統一的なモデリングの枠組みを示し、その枠組みをより有用なものとするため、モデルの中で扱っているドライバーの運転行動・思考に関する現象を解析している。第2章では、時々刻々の車両挙動を表現する既存のモデルについて包括的にまとめる。そして、第3章以降において、既存のモデルを踏襲し、運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデルの構築を行っていく。以下の図1.2に各章がどのような関係にあるかを示す。

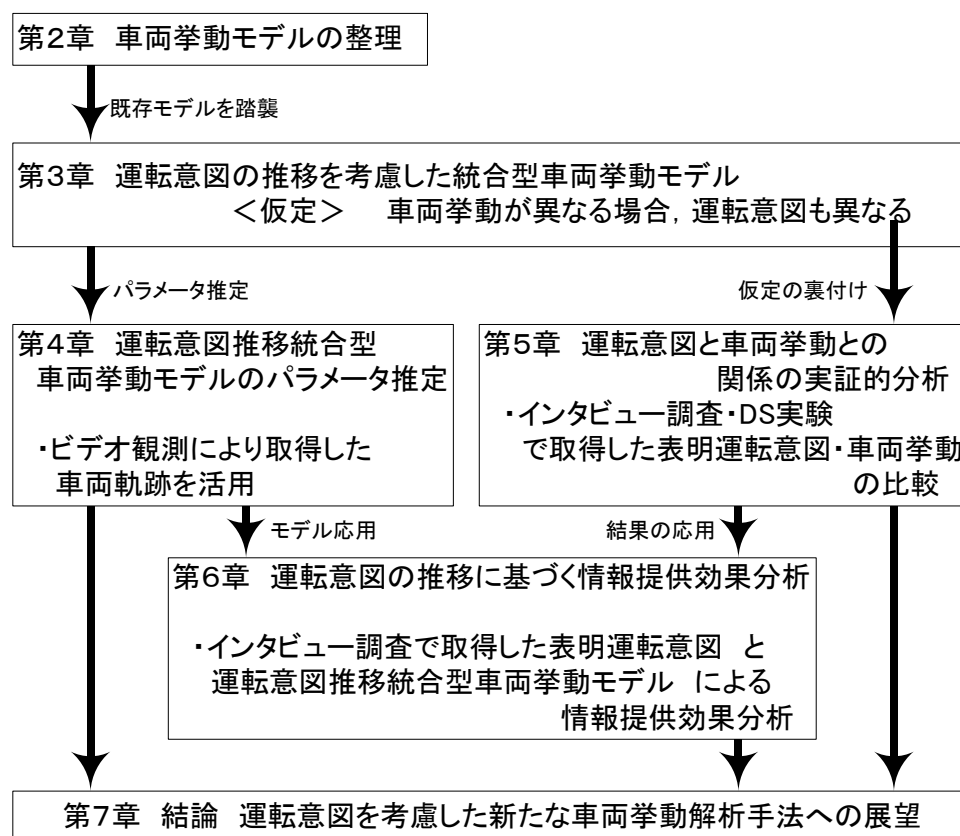


図 1.2 論文の構成

第3章では、既存のモデルを踏襲し、それらを統一的な手法で統合していくモデリングの過程について論じる。一般的な人の思考過程に関する心理的側面から、ドライバーが運転時に行うであろう思考の雛型を示し、モデル構築へ応用してゆく過程に関して考察する。そして、考察の結果としての「異なる車両挙動は異なる運転意図によって導かれる」「運転

意図は周囲の状況変化に合わせて時間的に変化する」という 2 つの仮定を元に構築した、運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデルの詳細を述べる。さらに、この章で考察したモデルの枠組みと、第 2 章で挙げた既存の車両挙動モデルとを比較し、運転意図推移統合型車両挙動モデルの既存のモデルとの相違と新規性を示す。

第 4 章では、第 3 章で述べた車両挙動モデルのパラメータを詳細な車両軌跡データを用いて推定する手法の詳細を述べる。そして、実際の具体的な車両軌跡に対してパラメータの推定を行い、当該モデルが従来モデルよりも高い精度で車両軌跡を再現できることを示す。

一方、第 5 章では、運転意図推移統合型車両挙動モデル構築の元となった仮定を支持する実験結果を示す。具体的には、ドライビングシミュレータ（以下 DS と呼ぶ）を用いた走行実験によって得た車両挙動等と、その後、被験者にインタビューを行って得た表明運転意図を比較することによって、車両挙動と運転意図との対応を確認する。また、運転意図推移統合型車両挙動モデルは運転意図の数や運転意図間の推移構造に関して妥当な仮定を置く必要があるため、表明運転意図にはどのような種類があり、どのような表明運転意図間の推移がどのような状況下でみられるかについて考察している。

続く第 6 章では、安全運転支援情報に対する表明運転意図の時系列的な変化、特に実験中に行った合流支援情報提供の前後における変化に着目し、情報提供が表明運転意図の推移に与える影響と車両挙動の変化について論じ、表明運転意図の推移を追うことで情報提供効果について一般的な洞察が得られる可能性を示す。加えて、DS 実験走行時のデータを用いて運転意図推移統合型車両挙動モデルのパラメータ推定を行うことを通して、当該モデルを用いた車両挙動解析の可能性について言及する。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章までで示した内容をまとめた上で、運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みと運転意図を用いて車両挙動を評価する手法論についての総合的な有用性と今後の利用可能性について述べ、本論文の結論とする。

2. 既存の車両挙動モデルの整理

2.1. はじめに

本章では既存研究で扱われている時々刻々の車両挙動を表現するモデルについて、分類別に概説し、既存のモデルにおける問題点と本研究で取り上げる着眼点を整理する。

2.2. 加減速挙動

時々刻々の車両挙動を表現するにあたっての主要な要素として加減速挙動が挙げられる。1950年代後半から研究が進められている追従モデルの構造は、加減速挙動を表現する際[1]に最も多く利用されている構造であるといえる。そのモデル構造はドライバーへの刺激となると考えられる、前方車両との相対速度等の項目を入力として用いて、ドライバーのアクセル・ブレーキ操作への反応、すなわち加減速を出力として算出するというものである。

追従モデル全般に関しては、大口[2]が詳しい。大口は追従モデルの出力が反応強度(感度パラメータ)と刺激(入力)の積で与えられるものとして、以下の6つのモデルに大別している。

- ・ 単項初等関数型
- ・ 単項指数関数型
- ・ 線形多項式型
- ・ 非線形多項式型
- ・ 非線形多項式複数反応遅れ時間型
- ・ 変動反応遅れ時間多項式型

単項初等関数型のモデルは Pipes[3]によって初めて提案された加速度を反応強度と相対速度の積で表現するモデルである、当初は定数の反応強度で提案されたが、後に速度、相対距離に、 $m, -l$ 次比例した反応強度を用いるものが提案されている[4]。このモデルは一般に GM モデルと呼ばれ広く利用されている。また、Chandler ら[5]によって反応時間を考慮したものが提案されている。単項指数関数型のモデルは Newell[6]によって提案されており、Newell モデルとして知られている。このモデルは単項初等関数型の反応強度に用いる相対距離を指数値で表現している。Kometani らによって提案、解析された線形多項式型[7][8]、非線形多項式型[9][10]のモデルは刺激項を複数に拡張したものである、また、複数の反応時間を用いた非線形多項式複数反応遅れ時間型や反応遅れ時間を時間的に変動するものとして扱った変動反応遅れ時間多項式型のモデルが存在する[11]。これらのモデルでは、加速度の説明に相対距離や相対速度を用いた場合において、マクロな交通流との整合性を分析するため、安定性の解析等が多数行われている。

しかし、これらの古典的な追従モデルや、その他の追従モデル等[12]では動的な自由流

から渋滞流への推移現象は説明不可能であろうという指摘を基に、サグ等におけるボトルネック現象を表現するため、横断勾配の説明変数を用いたモデルが越ら[13][14][15]によって提案されている。当該モデルは Xing ら[16]によって実データを用いた検証が行われており、個人属性としてのパラメータの分布を考慮した場合に、モデルを用いたシミュレーションにおいて追突が生じてしまう可能性があるという指摘がされている。そこで、尾崎は、追突が生じる原因の一端は加速時と減速時において反応時間が異なることにありと見え、ブレーキランプの点灯するような減速時における反応時間は比較的短いことを実データより示した[17][18][19]。

その後もサグの影響は無視できないものと考えられ、ドライビングシミュレータを用いて追従モデルについての知見を得ようとする研究が行われている。飯田ら[20]は複数の説明変数でサグの影響を考慮する流体モデルを提案しており、サグの影響を表わす項の影響が少なからず存在していることを示した。追従挙動に関しても、吉澤ら[21]によって道路特性と追従挙動との関係について研究されており、サグ部では上り勾配の影響を受けて、前方車両に対する反応が緩慢になる傾向が示されている。一方、追従特性は道路線形の影響とともに個人間の差異でも異なるのではないかと考えられているが、Chiabaut ら[22]は Newell モデルを用いた渋滞中のシミュレーションにおいて、個人間に差異のある車列中の車両の順序が渋滞延伸速度に影響を与えないという結果を示した。

追突が起こらないようなモデルとは対極的に、シミュレーション中で安全性を考慮するためのモデルについても研究されている。Bonsall ら[23]は説明変数に希望走行速度、希望追従間隔、反応時間、加速・減速の割合・最大値、車両間隔、運転規則等のパラメータを用いた追従モデルを内包する複数のシミュレーション結果から、再現性や安全性に影響のある追従モデルのパラメータと、実際の要因との間に乖離があることを示唆する結果を示した。Xin ら[24]も既存のモデルで衝突安全性を考慮することは難しいと指摘し、衝突を考慮した追従モデルを考案している。当該モデルでは、反応時間は個人間だけでなく速度、密度等の交通状況によって異なるとした上で、反応時間や周囲の交通状況の知覚間隔・知覚範囲、さらに希望追従間隔等を考慮している。モデルのキャリブレーション結果からは、当該モデルが通常の車両挙動と、事故に至るような危険な挙動の双方を再現できることが示されている。

他方で、車両の追従挙動において相対速度、相対距離の変化を観測すると、スパイラル曲線が見られるという知見を基に、スパイラル曲線によって追従挙動を表現しようという中山らの試み[25]が見られる。石田ら[26]はスパイラル曲線自体の 8 つのパラメータを推定し、それらのパラメータが持つ意味について言及している。葛西ら[27][28]は相対加速度を相対速度と相対距離、定数項で表現するばね質点系モデルを提案し、加速度を出力とするモデルとは異なる枠組みを構築している。

また、葛西ら[29]によって効用理論に基づいて追従挙動を記述する試みも行われている。

当該モデルは不快感を最小化させ、効用が最大となる加速度を選択するものであり、モデルに先読み概念を与えることによってさらに説明力が向上することが示されている[30].

さらに、加減速挙動の表現にはファジィ理論を用いたものも存在する. 菅沼ら[31]は、一般国道の織込み区間において、車線変更時のコンフリクトを考慮して、多重ファジィ理論を利用した加減速挙動のモデル化を試みている.

上述の加減速挙動の表現方法には大きく分けて 2 通りのアプローチが存在している. 一つは、古典的な追従モデルとその発展形にみられる加速度を説明変数の値を用いて算出するという方法、もう一つは運転規則やファジィ理論を導入した加速度を選択的に扱う方法である. 前者の表現方法は一定期間における連続的な加減速に着目しており、後者はより広い範囲の車両挙動の表現を目指していると考えられる. 特に前者のモデルの種類は多く、自由走行と追従走行、加速と減速、線形の違い等、状況が異なる場合は、当てはまるモデルが異なるといった前提が一般的なものとなっているといえる. そして、この状況の違いを考慮することによって、適用範囲を拡張したのが後者のモデルであると考えられる. また、状況が異なる場合には当てはまるモデルも異なるという前提に従った形のモデルとして、Koutsopoulos ら[32]は加速・減速等の複数の追従状態や自由走行状態を潜在状態として扱い、潜在状態に応じて複数の追従モデルを切り替える構造のモデルを構築している. さらに、連続的に当てはまるモデルの違いを扱うモデルとして、葛西ら[33]によってモデルのパラメータが徐々に変化する構造の追従モデルも研究されている.

一方で、追従以外の挙動に対して着目した研究は少ない. 例えば自由走行を表現する際は希望走行速度に漸近するように加速度を決定するモデルが一般的であるが、特筆すべき構造のモデルはほとんど存在しない. 上述した運転規則やファジィ理論を導入したモデルの中では、自由走行が 1 つの選択肢として扱われる傾向があり、一般的に自由走行は加減速挙動を表現する上での 1 つの様態として認識されているといえる. その他、モデリングには至っていないが、Xuan ら[34]は車線変更時の車両挙動を分析しており、車線変更挙動のモデリングに有用な知見が得られている.

2.3. 車線変更挙動

車両挙動の内、前後の速度や加速度を表現する追従モデルと並行して、車線変更等横方向の移動を記述するモデルが多数提案されてきた.

車線変更挙動をシミュレーション中で扱う方法として、Gipps[35]は Gap Acceptance モデルを提案しており、以後、この概念を用いた多数のモデルが構築されることとなる. この Gap Acceptance モデルは織込み合流を開始するか否かを、進入先車線の車両の位置関係を元に、時々刻々選択するモデルである. Hwang ら[36]は合流時へ Gap Acceptance モデルを応用しており、さらに、Lee[37]は車線変更挙動、織込み挙動、合流挙動の 3 通りの状況への Gap Acceptance モデルの応用を提案している. Webster ら[38]は事後の状態を考慮した

戦術的な車線変更モデルを提唱しており、Gap Acceptance モデルのように安全に Gap に流入できるかを確認し、車線変更することによる効用を確認すると言った 2 段階の戦術を考慮することによって、従来の効用理論に基づいた車線変更より説明力が高いモデルを構築している。車線変更要求が生じたタイミングを表現するモデルとしては、近藤ら[39]によって他車両との相互作用を取り入れたモデルが提案されており、当該モデルは TTC や前方車両との相対速度に関する効用が一定値に達した時点で車線変更するというものである。このモデルでは車線変更の判断を行ってからハンドル操作に移行するまでに 1 秒程度の時間間隔があると示されている。また、車線変更前に進入する Gap を選択するモデルとして倉内ら[40]は前方、直近、後方の車間から進入した Gap を選択させるモデルを構築しており、当該モデルは Gap 選択結果が車線変更のおよそ 5 秒前で良好な結果を示すことが記述されている。さらに、これらの車線変更要求、Gap 選択、Gap Acceptance を統合したモデルとして、Ahmed[41]、Toledo[42]、Ben-Akiva ら[43]はドライバーの段階的な選択を考慮したモデルを提案している。

ただし、当該モデルでは時々刻々全ての選択肢の考慮を行っており、1 時点における選択が、その時点以降の選択行動に与える影響を無視している。すなわち、時間的な選択の連続性を欠いている。例えば、一度車線変更したいと思い立った場合や目的車線・進入 Gap 等が一度決定された場合は数秒間に変更されない傾向があると考えられる。しかし、1 時点において全選択肢を考慮する構造は、決定した次の瞬間には車線変更を諦めているような行動を多く含むような構造であると考えられ、本来の車線変更に対する選択行動と乖離してしまう可能性が高い。そこで、Toledo[42]のモデルを改善したモデルとして Choudhury ら[44][45]は隠れマルコフチェーンモデル（HMM）を応用し、その潜在状態として車線変更要求、進入先 Gap 選択結果を持たせることで、選択行動に時間的な連続性を持たせた車線変更モデルを構築している。顕在変数としては加速度と車線変更を行った時点が用いられている。シミュレーションを用いた検証の結果、商用の AIMSUN のモデルよりも当該モデルの車線利用率の再現性が向上することが示されている。

一方で、織込みや合流は交通の効率性や安全性を低下させる重要な要因になっているとして、織込みや合流に着目した研究が多数行われてきている[46]。飯田ら[47][48]は強引な合流挙動が潜在的危険性を向上させると指摘している。

織込み合流に関して、内山[49]は、高速道路の夜間工事での車線規制区間を対象として、画像データを用いて得られた車両軌跡データを用いて、「合流を開始する」と「合流を見送る」という 2 つの選択を 2 項選択ロジットモデルで表現している。渡辺ら[50]は、高速道路の織込み合流部について画像データを利用し、「直近のギャップに合流する」「追い越して 1 台先のギャップに合流する」という 2 項選択のロジットモデルを構築し、さらに合流車の加速度推定モデルも提案している。Kita[51]は合流挙動を、非ゼロ和・非協力の 2 人ゲームとして表現しており、ファジィ推論や離散選択モデル以外にも合流挙動を表現するア

プローチが提案されている。また、柳原ら[52]は主車線同士が統合される合流部において車両が進入する車間を選択するモデルを構築しており、合流完了時点の5秒前までに進入する車間の選択が完了している可能性を示している。

このように、車線変更を表現するモデルでは、車線変更にかかわるドライバーの選択行動を離散選択モデルによって表現している。一連の車両挙動は離散選択行動を含む車線変更と加減速挙動の組み合わせによって表現できるが、離散選択という枠組みと連続的な加速度の算出という枠組みを統合した、解析的なモデルを構築するには、さらにこの2種類の車両挙動の関連性を考慮に入れた枠組みが必要となる。次節では、加減速挙動と車線変更挙動の両方に着目したモデリング手法について述べる。

2.4. 加減速挙動と車線変更挙動

加減速挙動と車線変更挙動を単一の概念で扱うものとして、セルオートマトンと呼ばれるモデルが存在し[53]、いくつかのシミュレーションで利用されている[54]。しかし、当該モデルは道路を一台の車両が占有できる多数の区間（セル）に分割した上で、車両が存在するセルを表現していくことで交通状況を再現するものであり、離散的なモデルであるため高い再現性が求められる事例には応用が難しい。対極的に車両の動きをハンドル角と加速度から説明し、車線を考慮しない二次元の動きとして扱うナノシミュレーションモデルと呼ばれるモデルも存在する[55]。しかし、基本的にドライバーは車線の中心を維持して走行していると考えられ、ナノシミュレーションは車線を認識するドライバーの判断を記述するには向かない手法であるといえる。

既存の知見を有効に活用するのであれば、追従モデル等と車線変更に関する離散選択モデルを統合した形のモデルを考慮すべきである。Sarvi ら[56][57]は織込み合流部における車両挙動のモデルを構築し、シミュレーションとドライビングシミュレータによる実験を行い、モデルの評価を行っている。モデルでは相対距離と速度の関係式に速度調整と車線変更行動の2段階で異なるものを用いて速度調整、流入挙動を表現している。このように合流部においては合流の選択行動のみでなく、その時の速度調整挙動にも特異性を考慮した分析が多い。Salvucci ら[58]によって行われた多車線区間におけるドライビングシミュレータを用いた実験では、車線変更に関しても車線変更前の減速、その後の加速がみられるなど、速度調整挙動に、一般の追従挙動とは異なる挙動が含まれることが示されている。当該論文では車線変更開始直後にドライバーの視線が車線変更の目的車線に移動したという結果が示されており、車線変更中は前方のみに集中している訳ではないことがわかる。この結果からも車線変更を行おうとしている車両は、特異な挙動を示し、進入される側の車両も特異な挙動を強いられることが考えられる。

しかし、車線変更の現象自体は多くのシミュレーションモデルの中で瞬時に起こる現象として扱われている。車線変更が瞬時に起こるものとして扱われることによって、車間の

譲り合いなどの、1 車両の車線変更によってもたらされる複数車両への影響がうまく表現できないといった問題が生じる。この問題を回避するために、Gap Acceptance 前後における状況と追従モデルとの対応関係を弱めたモデルを構築する研究が行われている。Laval ら[59]は既存のモデルに 1 つパラメータを加えた簡潔なモデルによって、この問題を回避している。Chevallier ら[60]はこの問題が渋滞時に顕著になり、ドライバーの予測行動が重要になることを指摘している。また、Toledo[61]は車線変更に一定の所要時間を持たせることが有用であるとして、車線変更に要する時間を推定するモデルを構築している。モデルの推定結果は、交通状況に左右されるものの、車線変更に要する時間は平均 4.6 秒となり、危険性が高いほど時間が長くなる傾向を示している。

これまでは、多くの研究において車線変更に関するドライバーの選択行動と加減速挙動は独立した挙動として扱われてきた。また、車線変更自体も瞬時に起こるものとして扱われ重要視されてこなかった。しかし、車線変更時及び、その前後の加減速挙動は、決して車線変更に関するドライバーの選択行動と無関係ではない。車線変更に関するドライバーの選択行動と加減速挙動との相互関係は、車線変更モデルと追従モデルが独立した枠組みでは表現し難い。次節では、追従挙動と車線変更挙動 2 つの挙動を単一のモデルで表現した既存研究について述べる。

2.5. 統合型車両走行モデル

車線変更に関する選択行動と加速度調整を単一のモデルで表現した例として、Toledo ら[62][63][64]によって構築されたものが存在する。当該モデルは図 2.1 に示すように、潜在状態として目的車線、Gap Acceptance 結果、進入先 Gap を持ち、ドライバーがどのような行動をしようとしているかを示すものとして扱っている。この潜在状態は総括して PLAN と呼ばれ、潜在状態を確率的に求めるための顕在変数には、車線変更動作（当該時点で車線変更をしたか否か）と、車両の加速度値が用いられており、これらを ACTION と呼んで PLAN と対比させている。当該モデルに従うと、ドライバーは各時点において、段階的な選択をすることになる。

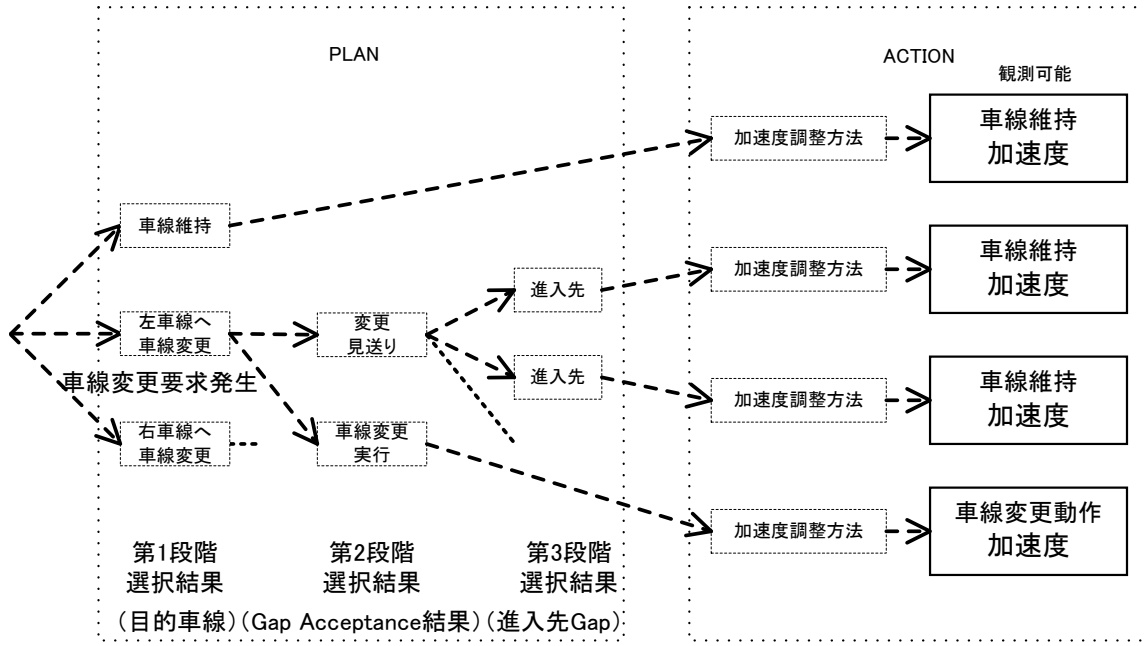


図 2.1 既存研究におけるドライバーの意思決定図

第 1 段階目の選択として、ドライバーはどの車線に移動したいかを選択する。この時、選択する車線の中には現在ドライバーの運転している車両が存在している車線も含まれており、ドライバーが車線変更を要求しない場合もあり得ることに注意されたい。第 2 段階目の選択は、車線変更要求が発生した場合に行われ、ドライバーはその時点において車線変更が可能かどうかを確認する。この枠組みは Gap Acceptance モデルの枠組みと類似しており、既存の研究の知見を踏まえた説明変数選択がなされている。第 3 段階目の選択は車線変更が生じたものの変更が見送られた場合に発生し、以後どの Gap に進入するかを選択する。以上の選択をもとに、車線変更動作と加速度の操作を表す ACTION を出力するという構造がこのモデルの大枠である。モデル中における各選択行動は以下の式(2.1)に示す、最大効用モデルによって記述されている。

$$U_n^d(t) = \beta^d X_n^d(t) + \gamma^d EMU_n^d(t) + \chi^d v_n + \varepsilon_n^d(t) \quad (2.1)$$

- $U_n^d(t)$: 効用
- $X_n^d(t)$: 説明変数ベクトル
- d : 選択肢 (潜在状態を示す潜在変数)
- n : 個人番号
- t : 時刻
- v_n : 個人パラメータ
- $\beta^d, \gamma^d, \chi^d$: モデルパラメータ

$$EMU_n^d(t) : \text{Expected Maximum Utility} = \max_{d^*} U_{lower_n}^{d^*}(t)$$

$$\varepsilon_n^d(t) : \text{誤差}$$

ここで、 $EMU_n^d(t)$ は下段階の選択結果を反映する指標として用いられている． EMU の値は下段階における選択肢の効用値の内、最も大きいものをその値にとる．目的車線，Gap Acceptance 結果，進入先 Gap の3段階の各選択において式(2.1)が用いられる．各効用には誤差を仮定しており，行動の選択結果を確率的に扱うことによってモデルパラメータを推定可能にしている．また，加速度の EMU には確率密度が当てはめられており，結局，パラメータ推定は式(2.2)，式(2.3)の尤度最大化問題として定式化されている．

$$\max_{\text{functions}} L = \sum_n \ln(L_n) \quad (2.2)$$

where

$$L_n = \iiint \sum_{v \in \mathcal{V}} \prod_{d \in \mathcal{D}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{TL(t) \in \mathcal{TL}(t)} \sum_{TG(t) \in \mathcal{TG}(t)} \left\{ \begin{array}{l} P_n(TL(t)|d, v) \\ P_n(l(t)|TL(t), v) \\ P_n(TG(t)|TL(t), v) \\ f_n(a(t)|TL(t), l(t), TG(t), v, \tau, h^*) \\ f(h^*)f(\tau)f(v) \end{array} \right\} dh^* d\tau dv \quad (2.3)$$

・ 変数一覧

τ	: 反応時間
h^*	: 追従車頭間隔閾値
v	: 個人パラメータ
$P_n(TL(t) d, v)$: 車線変更要求段階の各選択確率
$P_n(l(t) TL(t), v)$: Gap Acceptance 段階の各選択確率
$P_n(TG(t) TL(t), v)$: Gap 選択段階の各選択確率
$f_n(a(t) TL(t), l(t), TG(t), v, \tau, h^*)$: 加速度誤差確率密度
$f(h^*)$: 追従車頭間隔閾値誤差確率密度
$f(\tau)$: 反応時間誤差確率密度
$f(v)$: 個人パラメータ確率密度

パラメータの推定結果では，72 個存在するパラメータの内のおよそ半数は有意な t 値を示し，符号も期待される結果が得られていることが示している．加えて，4 車線 Highway における 1km 区間におけるシミュレーション結果から，非統合型モデルよりも旅行時間の

誤差が 2 割減少することを示している。

しかし、車線変更を瞬時に発生する現象として取り扱われており、車線変更等に伴う交通流の乱れなどに対して十分な再現性が得られないと考えられる。さらに、推定に用いたデータは 442 車両、1 秒毎の 15632 プロットの車両軌跡であり、1 秒間隔の車両軌跡はミクロな車両軌跡を表現するには、十分な解像度とは言い難い。1 秒間隔で加速度等を入力するモデルでは、急な車間距離の変化に応じたドライバーの即座の反応を、最大 1 秒遅らせて評価してしまう可能性がある。森津[65]は、追従挙動におけるスキャン間隔の影響は、安定な状態で小さいものの、不安定な状態、交通量が多い場合に現状を正確に再現できない場合が多いと指摘している。交差点におけるシミュレーションでは、0.1~0.2 秒のスキャン間隔を用いた場合、結果にそれほど差異は生じないが、0.5 秒以上のスキャン間隔を用いると正確な結果が得られないと述べられている。

上述した Toledo らのモデルは車線変更挙動と加減速挙動を単一のモデルとして扱う手法として有用な構造を含んでいる。それは、加速度と車線変更の組み合わせた選択結果をモデルの出力結果として採用している点である。段階的な車線変更を伴う選択モデルは従来のモデルの構造を踏襲すれば、自然な構造であると言えるが、最終的な出力結果に加速度の値を導入しており、Koutsopoulos ら[32]のモデルと同様に加速度の誤差を考慮することでパラメータ推定を可能にしている点で従来のモデルの枠組みと大きく異なるモデルであるといえる。

さらに本研究の先行研究として、上述した Toledo らのモデルの構造を HMM の概念を取り入れることによって拡張した、加速度と車線変更挙動を扱ったモデル[66]も存在するが、ドライバーの運転行動と合致しているか否かは定かではない。また、加速時・減速時の挙動の違いと、車線変更に関する加減速挙動の違いを統一的な枠組みで扱える構造となっていない。

2.6. まとめ

ここで、既存のモデルにおける問題点を再度整理しておく。第 2.2 節で挙げた加減速挙動を表現する追従モデル等には、様々な種類が存在しており、ほとんどのモデルが古典的な追従モデルに準じた構造のモデルか、その組み合わせである。古典的な追従モデル等を組み合わせる構造のモデルは、1 つ 1 つの追従モデル等が特定の状況下においてのみ、再現性が高くなるという前提でモデリングを行っているといえる。しかし、その組み合わせの手法、すなわち「特定の状況」を特定する手法に関する研究は少なく、十分な知見が得られていないといえる。例えば、本章で挙げたモデルでは、追従挙動と自由走行、加速状態と減速状態で分離しているが、その分離構造自体に対しては、更なる知見が必要であると考えられる。

一方、第 2.3 節で述べたように車線変更に関しても様々な種類が存在しているが、多く

のモデルは Gap Acceptance の構造に基づいたモデルである。ただし既存のモデルの多くは単純な選択モデルであり、その選択が車両挙動、特に加減速挙動に与えている影響までは考慮できていない。第 2.5 節で挙げた車線変更挙動と加減速挙動を統合したモデルも存在するが、車線変更自体の扱いやパラメータ推定の精度に問題を抱えている。また、そのモデル構造自体がどの程度、運転行動の実態に即しているか否かに関する知見は皆無であるといえる。

本研究では、本章で挙げた既存のモデルを踏襲した、車線変更と加減速挙動を表現する統合型モデルの構築を目指している。よって、最後に、本研究で構築する統合型モデルに取り入れる既存モデルの特徴を列挙する。まず、速度調整に関しては、多くの既存研究が存在するため、前方車両との相対距離等の刺激と感度パラメータで加速度を表現する追従モデルの構造が有用であると考えられる。その追従モデルで一連の加減速を表現する場合、既存研究の内容を踏まえると、加速時、減速時、自由走行時といったモード間の感度等の違いを考慮することが望ましく、モードを選択できるモデル構造を取り入れるべきであるといえる。また、車線変更に関しては、車線変更先の決定、Gap 選択、Gap Acceptance という段階を踏んだ選択構造に加え、時間的な選択結果の変化、各選択結果に対応した加減速挙動、車線変更中の車両挙動を扱えるモデル構造が望まれる。

次章では、運転意図を考慮しつつ、上記の特徴を備えたモデルの構築を行う。

参考文献

- [1] Gipps, P. G., 'A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation', Transpn. Res., Vol.15B, No.2, pp.105-111, 1981.
- [2] 大口敬, '高速道路単路部渋滞発生解析- 追従挙動モデルの整理と今後の展望-', 土木学会論文集, No.660/IV 49, pp.39-51, 2000.
- [3] Pipes, L. A., 'An Operational Analysis of Traffic Dynamics', Journal of Applied Physics, Vol.24, No.3, pp.274-287, 1953.
- [4] Gazis, D. C., Herman, R., Rothery, R. W., 'Nonlinear Follow-the Leader Models of Traffic Flow', Oper. Res., Vol.9, pp.545-567, 1961.
- [5] Chandler, R. E., Herman, R., Montroll, E. W., 'Traffic Dynamics, Studies in Car Following', Oper. Res., Vol.6, pp.165-184, 1958.
- [6] Newel, G. F., 'Nonlinear Effects in the Dynamic of Car Following', Oper. Res., Vol.9, pp.209-229, 1961.
- [7] Kometani, E., Sasaki, T., 'On the Stability of Traffic Flow (Report 1)', J, Oper. Res. Soc. Japan, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.
- [8] Kometani, E., Sasaki, T., 'On the Stability of Traffic Flow (Report 2)', J, Oper. Res. Soc. Japan, Vol.2, No.2, pp.60-79, 1959.
- [9] Kometani, E., Sasaki, T., 'A Safety Index for Traffic with Linear Spacing', Oper. Res., Vol.7, pp.704-720, 1959.
- [10] Kometani, E., Sasaki, T., 'Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-Speed Relationship', Proc. of the International Symposium on Theory of Traffic Flow (GM), pp.105-119, 1959.
- [11] Del Castillo, J. M., 'A Car Following Model Basedon the Lighthill-Whitham Theory', Proc. of 13th ISTTT, pp.517-538, 1996.
- [12] Gazis, D. C., Herman, R., Potts, R. B., 'Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow', Oper. Res., Vol.7, pp.499-505, 1959.
- [13] 越正毅, '高速道路トンネルの交通現象', 国際交通安全学会誌, Vol.10, No.1, pp.32-38, 1984.
- [14] 越正毅, '高速道路のボトルネック容量', 土木学会論文集, No.371/IV 5, pp.1-7, 1986.
- [15] 越正毅, 大口敬, '高速道路サグにおける渋滞とその対策', 道路, No.651, pp.65-69, 1995.
- [16] J. Xing, 大口敬, 越正毅, '高速道路単路部の交通流の動的特性', 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.621-628, 1991.

- [17] 尾崎晴男, '自動車の追従走行挙動に関する研究', 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- [18] 尾崎晴男, '車両の追従挙動とサグの隘路現象', 東京大学学位論文, 1994.
- [19] Ozaki, H., 'Assistance of Drivers to Mitigate Highway Capacity Problem', Proc. of 2nd WC on ITS, pp.1727-1731, 1995.
- [20] 飯田克弘, 藤原一雅, '3次元車両軌跡を用いた高速道路サグ部における交通流挙動解析', 交通工学研究発表会論文報告集, No.24, pp.13-16, 2004.
- [21] 吉澤隆司, 塩見康博, 宇野伸宏, 飯田克弘, 'ドライビングシミュレータを用いた高速道路サグ部における追従挙動特性の解析', 交通工学研究発表会論文集, No.30, pp.53-56, 2010.
- [22] Chiabaut, N., Leclercq, L., Buisson, C., Christine Buisson, 'From heterogeneous drivers to macroscopic patterns in congestion', Transpn. Res., Vol.44B-2, pp.299-308, 2010.
- [23] Bonsall, P., Liu, R., Young, W., 'Modelling safety-related driving behaviour-impact of parameter values', Transpn. Res., Vol.39A-5, pp.425-444, 2005.
- [24] Xin, W., Hourdos, J., Michalopoulos, P., Davis, G., 'The Less-Than-Perfect Driver A Model of Collision-Inclusive Car-Following Behavior', Transpn. Res. Record., Vol.2088, pp.126-137, 2008.
- [25] 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎, 'スパイラル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討', 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp.25-28, 1993.
- [26] 石田貴志, 成田紘也, 野中康弘, 葛西誠, 'スパイラル曲線を用いた追従モデルの構築', 土木学会論文集, No.30(291), 2004.
- [27] 葛西誠, 内山久雄, 野中康弘, 'スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化', 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.65-75, 2007.
- [28] 葛西誠, 'スパイラル曲線として表現される車両追従挙動モデルの交通流再現性', 土木計画学研究・講演集, No.37(92), 2008.
- [29] 葛西誠, 加藤瑞穂, 内山久雄, '効用理論に基づいた追従挙動のモデル化に関する基礎的研究', 土木計画学研究・講演集, No.38(177), 2008.
- [30] 葛西誠, 加藤瑞穂, 内山久雄, '道路サービス水準評価を念頭に置いた車両追従挙動モデル', 土木計画学研究・講演集, No.39(78), 2009.
- [31] 菅沼真澄, 飯田恭敬, 宇野伸宏, '車線変更時のコンフリクトを考慮した加減速挙動のモデル化', 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.58/IV 264, 2003.
- [32] Koutsopoulos, Haris N, Farah, Haneen, 'Latent class model for car following behavior', Transportation research part B: methodological, Vol.46, No.5, pp.563-578, 2012.
- [33] 葛西誠, 柴垣俊, 寺部慎太郎, '階層ベイズ法によるバネ質点系追従挙動モデルパラメータの時変推定', 土木計画学研究 講演集, No.46, 2012.

- [34] Xuan, Yiguang, Coifman, Benjamin, 'Identifying Lane-Change Maneuvers with Probe Vehicle Data and an Observed Asymmetry in Driver Accommodation', *Journal of Transportation Engineering*, Vol.138, No.8, pp.1051-1061, 2012.
- [35] Gipps, P. G., 'A model for the structure of lane-changing decisions', *Transpn. Res.*, Vol.20B-5, pp.403-414, 1986.
- [36] Hwang, S. Y., Park, C. H., 'Modeling of the gap acceptance behavior at a merging section of urban freeway', *Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp.1641-1656, 2005.
- [37] Lee, G., 'Modeling gap acceptance at freeway merges', *Department of Civil and Environmental Engineering, MIT.*, 2006.
- [38] Webster, N. A., Suzuki, T., Kuwahara, M., 'Driver Model for Traffic Simulation with Tactical Lane Changing Behavior.', *Seisan-Kenkyu*, Vol.59, No.3, pp42-45, 2007.
- [39] 近藤啓介, 鈴木高宏, Nathan A. Webster, 桑原雅夫, '他車両との相互作用を取り入れた横方向運転行動モデルの同定', 第5回 ITS シンポジウム 2006, 2006.
- [40] 倉内文孝, 丸尾香菜子, 宇野伸宏, 高木朗義, '画像データを用いた高速道路合流部の車線変更挙動のモデル化', *交通工学研究発表会論文集*, No.29, pp.77-80, 2009.
- [41] Ahmed, K. I., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., Mishalani, R. G., 'Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior. ', *Proc. of the 13th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.501-515, 1996.
- [42] Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., 'Modeling integrated lane-changing behavior. ', *Transpn. Res. Board.*, Vol.1857, pp.30-38, 2003.
- [43] Ben-Akiva, M., Charisma, C., Toledo, T., 'LANE CHANGING MODELS', *Transport Simulation 2006*, B4, 2006.
- [44] Choudhury, C., 'Thesis. Modeling Driving Decisions with Latent Plans', *Department of Civil and Environmental Engineering, MIT*, 2007.
- [45] Choudhury, C. F., Ben-Akiva, M., Abou-Zeid, M., 'Dynamic Latent Plan Models', *Journal of Choice Modelling*, Vol.3, No.2, 2010.
- [46] 片倉正彦, '織込み区間に関する研究の現状と課題', *土木学会論文集*, No.440/IV 16, pp.33-40, 1992.
- [47] 飯田克弘, 日暮智紀, 高橋秀喜, Xing, J., 山下和彦, '高速道路の工事規制始端部における規制材配置と車両挙動との関連性分析', *土木計画学研究・講演集*, No.40(215), 2009.
- [48] 飯田克弘, 山口将夫, 松本 晃一, '重交通路線合流部における交通挙動の解析', *交通工学研究発表会論文集*, No.29, pp.73-76, 2009.
- [49] 内山久雄, '高速道路における工事時の合流意思決定プロセスのモデル化', *土木学*

会論文集, No.625/IV 44, pp.29-37, 1999.

[50] 渡辺将光, 中村英樹, 'ビデオ画像を用いた都市高速合流部における合流挙動に関する分析', 土木計画学研究・講演集, No.32, 2005.

[51] Kita, H., 'A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis', Transpn. Res., Vol.33A-3-4, pp.305-312, 1999.

[52] 柳原正実, 宇野伸宏, 塩見康博, 倉内文孝, '画像データを活用した都市高速合流部における合流ギャップ選択モデル', 土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp551-560, 2010.

[53] Nagel, K., 'A cellular automaton model for freeway traffic.', Journal de physique, Vol.2, No.12, pp2221-2229, 1992.

[54] 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄輔, 'セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション', 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.SIG 10 (TOM 12) 数理モデルと応用, 2005.

[55] 鈴木一史, 中村英樹, '交差点安全性評価を目的とした 2D ナノシミュレーションにおける利用者挙動の表現', 土木計画学研究・講演集, No.37(86), 2008.

[56] Sarvi, M., Kuwahara, M., Nishikawa, I., 'A simulation model for evaluation of merging capacity on the Metropolitan Expressway.', Seisan-Kenkyu, Vol.52, No.2, pp16-19, 2000.

[57] Sarvi, M., Kuwahara, M., Ceder, A., 'Free Ramp Merging Phenomena in Congested Traffic Using Simulation Combined with a Driving Simulator', Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.19, pp.351-363, 2004.

[58] Salvucci, D. D., Liu, A., 'The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior', Transpn. Res., Vol.5F-2, pp.123-132, 2002.

[59] Laval, J. A., Leclercq, L., 'Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model', Transpn. Res., Vol.42B-6, pp.511-522, 2008.

[60] Chevallier, E., Leclercq, L., 'Do microscopic merging models reproduce the observed priority sharing ratio in congestion?', Transpn. Res., Vol.17C-3, pp.328-336, 2009.

[61] Toledo, T., 'Modeling Duration of Lane Changes', Traffic Flow Theory 2007, pp.71-78, 2007.

[62] Toledo, T., 'Thesis. Integrated driving behavior modeling.', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2003.

[63] Toledo, T., Haris N., Ben-Akiva, M., 'Integrated driving behavior modeling.', Transpn. Res., Vol.15C, pp.96-112, 2007.

[64] Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., 'Estimation of an Integrated Driving Behavior Model', Transpn. Res., Vol.17C-4, pp.365-380, 2009.

[65] 森津秀夫, '交通シミュレーションにおけるスキャン間隔の精度への影響', 流通科学大学論集-経済・経営情報編-, Vol.16, No.2, pp.59-70, 2008.

[66] Yanagihara, M. , Uno, N. , Shimamoto, H. , and Shiomi, Y. , 'Integrated driving behavior model considering the driver's latent intention', Transportation and Geography, Proceedings of the 16th International Conference of Hong Kong Society for Transportation, pp.27-34, 2011.

3. 運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデル

3.1. はじめに ～運転意図とは～

ドライバーは運転中に様々なことを考えている。運転している今現在、加速するべきか、あるいはブレーキを踏むべきか。今後、どの車線を走行すると都合がよいか、どの時点で車線変更しようか。今日は、どの経路を辿って帰宅しようか、帰宅してからどうしようかなど。運転中にドライバーが考えていることには様々なことが含まれているであろう。その中でも、運転しているその瞬間、または、数刻中に「どのような運転をするか」について考えていることは車両挙動を決定づける重要な要素であると考えられる。本研究では、上記のような要素、ドライバーが運転について考えていること、すなわちドライバーが運転に対して持っている意図を「運転意図」と称して、この運転意図に焦点をあてた車両挙動解析を試みている。

本章では、一連の車両挙動全体を表現すべく、複数種類の加減速挙動と車線変更に関する段階的な選択を統合しており、且つ、運転意図の推移を考慮している統合型車両挙動モデルの枠組みの導出とその構築過程を詳細に述べる。また、この運転意図推移統合型車両挙動モデルの既存のモデルとの相違と新規性を示すとともに、モデル中で扱う運転意図がどのような位置づけにあるのかを示す。

3.2. 既存モデルを統合した車両挙動モデルの考察

車両挙動は複雑である。第2章で述べたように、これまで様々なモデルで車両挙動を記述しようとする研究が存在している。古典的な追従モデル等は、限られた場面における適合性は高いものの、明らかに1つモデルでは、複数種類の加減速挙動と車線変更に関する段階的な選択を含む一連の車両挙動全体を適確に表現できない。また、状況によってモデルのパラメータ等が異なると言った研究結果[19]も存在する。例えば、安定した追従をしている状態の車両挙動を表す「追従モデル」と、前方車両が急接近してきたときに急制動をかけている状態の車両挙動を表すモデルとは全く別物となるが、各々の状況に対してはそれぞれよく適合したモデルが存在する。このことから、導かれる結論は、車両挙動に複数の様態が存在しているということである。既存の研究においても、このような複数の様態を考慮している、または暗に扱っているものが多い。この複数の様態を本研究では「車両挙動様態」と呼ぶ。

一連の車両挙動は、安定した追従、自由走行、急制動等、数秒から数十秒の小さな期間の単純な車両挙動の寄せ集めであると考えることができる。このときの1つ1つの小さな期間における単純な車両挙動、すなわち車両挙動様態は1つの古典的な追従モデル等で十分表現可能であり、一連の車両挙動も複数の古典的な追従モデル等を統合したモデルで表現できると考えられる。複数の車両挙動様態が混在する一連の車両挙動を、統合的なモデ

ルで表現する場合の問題は、図 3.1 のように、各時点における車両挙動が属している車両挙動様態を決定する枠組みが必要となることである。また、複数の車両挙動様態が混在する一連の車両挙動は、幅を持った期間毎の車両挙動様態に分割されるべきである点も考慮しなければならない。

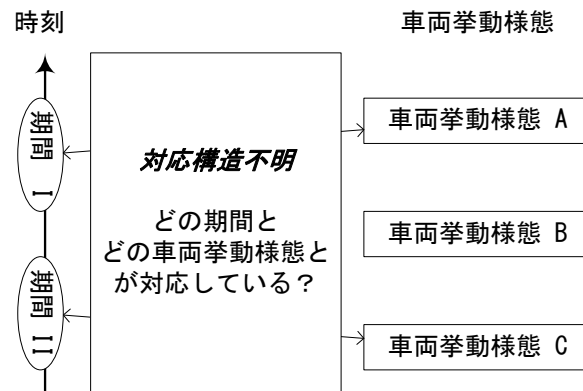


図 3.1 走行時点と車両挙動様態

車両挙動様態の違いは何に起因しているのでしょうか？道路線形，周囲の車両の状況，自車両の状態等，様々な要因が考えられるが，車両挙動はドライバーの運転行動の結果であることを考えると，ドライバーの行動，さらにはその根源となるドライバーの思考，すなわち本研究で考えている運転意図が異なるために，車両挙動様態が異なっている可能性が高い。逆に捉えると，とある車両挙動様態は，ドライバーがある挙動を自分の車にさせようという運転意図をもった結果であると考えられる。車両挙動様態の違いが現れる要因には，運転意図の他にも様々な要素が考えられるが，この運転意図がその大部分を包含していることは容易に推察できる。この運転意図と車両挙動様態との関係は以下の図 3.2 のようになる。

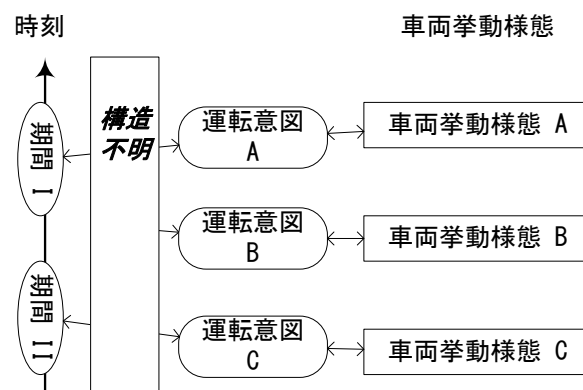


図 3.2 車両挙動様態と運転意図

車両挙動様態の違いが運転意図の違いに起因するという仮定はモデルを構築する上で 1 つの大きな道標となる．図 3.2 の構造では車両挙動様態と時刻を対応させる問題は依然として解決されていないが，車両挙動様態と時刻との対応問題が，時々刻々の運転意図の選択問題に帰着している．運転意図の選択という構造は，既存の研究における車線変更に関わる選択モデルと同一である．なぜなら，車線変更モデルで対象としている選択肢はドライバーの考えていることそのものだからである．例えば，「車線を維持する」というドライバーの選択結果，すなわち運転意図は車線を維持する車両挙動様態の要因となっていると想定できる．

既存の研究を踏まえると運転意図の選択構造として，大きく 2 種類の表現手法が考えられる．その一つは，時々刻々，考えられる全ての選択肢を考慮し，その選択を選択モデルを段階的に組み合わせて表現する Toledo ら[42]が構築したモデルに代表される構造である．以降ではこの構造を「全選択型」と呼ぶ．もう一方の表現手法は，次の瞬間に行動を変えるかどうか，どう変えるのかを，現在の意図と行動に基づく限られた選択肢の中から時々刻々選択する構造であり，Choudhury[44]が構築したモデルに代表される．以降ではこの構造を全選択型に対して「推移選択型」と呼ぶ．部分的な運転意図の選択，例えば Gap Acceptance モデルにみられる，「今そのギャップに進入するか否か」といった選択は，全選択型では，段階的に組み合わされた選択モデルの一つとして表現され，推移選択型では，「ギャップに進入しよう」という運転意図を持つ時点における運転意図推移の選択モデルとして内包される．いずれの枠組みが適切かに関しては，次節以降の内容を踏まえて再検討する．

3.3. 運転意図と車両挙動に関する考察

車両挙動モデルを構築する上でドライバーが考えていることを考慮することは必然の流れであるといえる．本節では，ドライバーが一般的に行っている思考について考察する．

我々が行う目的を持った行動は自身の中の計画や方針，意図等に導かれている場合が多い．その時の人の行動は心理学の分野では行為（action）と呼ばれている[67]．そして，運転という特殊な行動は，特殊であるがゆえに間違いなく，偶発的なものではなく意図的な行為であるといえる．加えて，自動車を運転するという行為には，交通ルールや教習所で教わる安全に関する注意事項を守りつつ，目的地にいくという目的があるため，また，運転は一連の連続した行為であり，そこにはドライバーの未来志向的意図が少なからず存在すると考えられるため，ドライバーは時間的に連続した何らかの方針（policy）や計画（plan），意図（intention）を持っているはずである．もし，ドライバーに時間的に連続した意図がなければ，現在の意図と数刻前の意図に矛盾が生じ，結果的に支離滅裂な車両挙動が観測されるであろう．

心理学的な考察[68]に基づけば，意図，および計画は，段階的に存在し，必ず下位の意

図は上位の計画や方針，意図を実現するための手段となっている．より下位の意図は，行為に移される直前まであいまいであることが多いが，行為直前になれば，具体的な意図が形成され実行されると考えられている．この時の具体的な意図は，上位の計画よりも短期的なものといえる．

計画から意図が構築される一般的な過程は，自動車を運転中のドライバーの思考過程にも当てはまると考えられる．本研究では走行する経路が決定している状況下での車両挙動を扱うため，本研究で扱う最も上位の計画は「決まった経路に沿って走行する」ことである．ドライバーはこの計画に従って，より具体的で短期的な運転意図を形成し実行するという運転行動を行っているといえる．また，運転行動という行為の結果として現れる車両挙動様態に関して，単一の古典的な追従モデルによって加減速が表現できるような一括りの車両挙動様態は，意図がより具体的なものとなってゆくどこかの段階における1つの運転意図から導かれていると考えることができる．従って，一括りの車両挙動様態を導く運転意図には，より上位の運転意図や，より下位の運転意図が存在する可能性があるが，本研究では一括りの車両挙動様態を導く運転意図に特に着目する．なお，どの程度の範囲の車両挙動様態を一括りとして扱うのかは解析やモデルの方針・対象に合わせて適宜変更し調整できるものとして扱う．一括りとして扱う車両挙動様態の範囲を縮小し，対応して，着目する運転意図の種類を増加させることによって，車両挙動解析の解像度や構築する車両挙動モデルの精度を上げることができるが，解析結果やモデル構造は煩雑なものとなる．

この運転意図と車両挙動様態の関係は図 3.3 に例示するような関係になる．図中において運転意図は薄赤の楕円で示しており，着目する車両挙動様態 A～C が，それぞれ運転行動 A～C，着目する運転意図 A～C から導かれていることを示している．また，運転意図 B には下位の，運転意図 B と C には上位の着目していない運転意図が存在している．

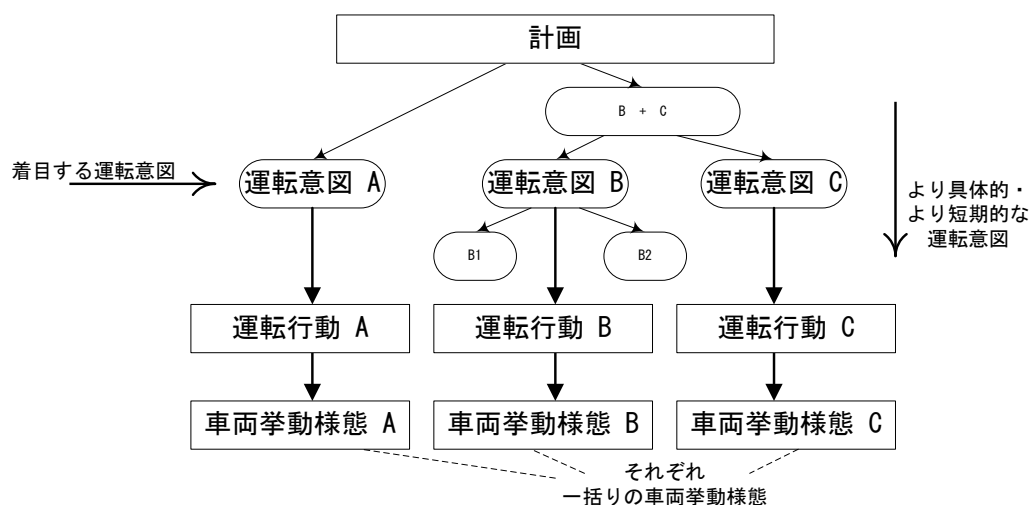


図 3.3 運転意図と車両挙動様態の関係

運転意図と車両挙動様態の関係の具体例として、図 3.4 に示すように、「前方車両に追従する」という運転意図をドライバーが持っているとき、そのドライバーは「前方車両との車間を保つためのアクセルペダルの調整」行動を取り、外部からは「前方車両への追従走行」に類する車両挙動様態が観測される。また、「前方車両と衝突しないように減速する」といった運転意図からは、「ブレーキをかけ続ける」という運転行動と減速する車両挙動が導かれると考えられる。この 2 つの車両挙動様態はいずれも前方車両に対応した走行でありながら、少し異なる挙動となる。車両挙動を精緻に扱うならば、2 つを別々の挙動として考慮し、構造の煩雑化を避けるならば、2 つをほぼ同一の挙動として扱うことが望まれる。

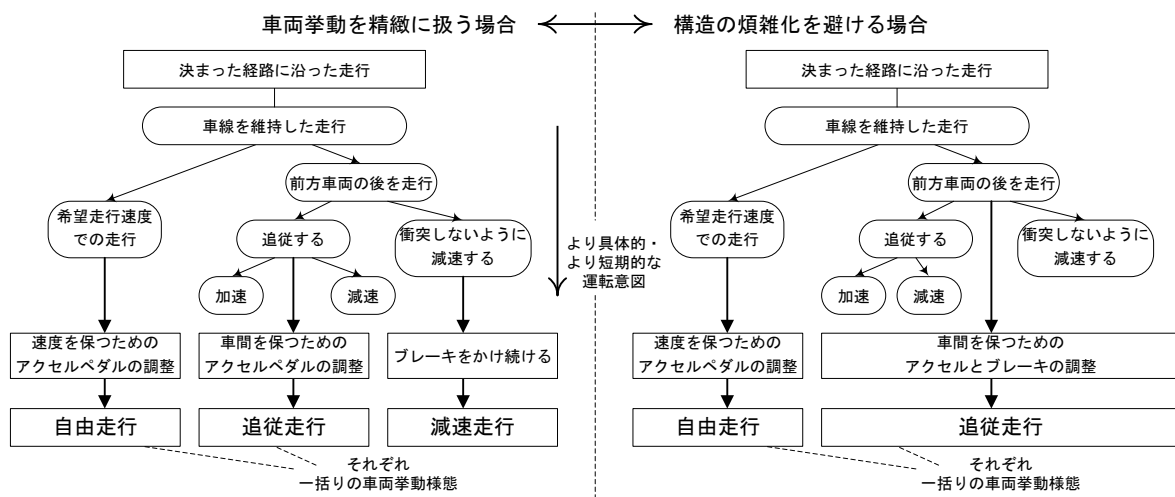


図 3.4 運転意図と車両挙動様態の具体例と車両挙動の扱い方の違い

図 3.4 の例では、「追従する」という運転意図の下位にも複数の運転意図が存在すると考えている。具体的には、「追従する」という運転意図はさらに「加速」、「減速」する場合の運転意図と車両挙動様態に分割できる可能性が図示されている。

上述したように車両挙動をどこまで精緻に扱うのかが異なっていたとしても、車両挙動様態と運転意図との関係は、「異なる車両挙動様態は異なる運転意図によって導かれる」という仮定に基づいて定義する。

図 3.3、図 3.4 における運転意図と車両挙動様態の関係は、第 3.2 節で述べた、運転意図と車両挙動様態が対応関係にあるという関係そのものである。よって、一般的な計画や意図が構築される過程を運転意図の形成過程にも当てはめて、車両挙動様態が導かれるモデルを構築することで、実際のドライバーの思考に近い運転行動をモデル中で表現できる可能性がある。

3.4. 運転意図の推移に関する考察

Bratman[68]は、計画は時間的に安定しているが、ある状況下では再調整されると考えている。下位の計画としてみなすことのできる意図も、同様の傾向を持つといえる。運転時のドライバーの思考に置き換えると、運転意図は時間的に安定しており、自車及び周囲の状況の変化に応じて運転意図が推移すると考えることができる。例えば、ゆったり前方車両を追って走行していた次の瞬間、前方車両が急接近して来る状況を考える。多くの場合、ドライバーは危険を感じて意識的にブレーキを踏もうとするであろう。運転意図を用いて言い換えれば、「追従する」という運転意図を継続的に持っていた状態から、「前方車両に衝突しないように減速する」という運転意図を持った状態に変化するという再調整が行われたとみなすことができる。このような運転意図の変化や再調整は常に行われているのではないだろうか。また、一般的な意図の再調整にあたって人は多くの選択肢を一度に判断・選択できるとは考えにくい、特に運転という複雑な操作の中で判断できる運転意図の選択肢は限られているであろう。よって、運転意図が再調整されるとき、大いに現在の運転意図の影響を受けていると考えられる。車線変更や合流を始めるといった、不可逆な変化も運転意図が変化したものとしてみなすこともできる。

上述したように、運転意図は時間的に安定しており、「運転意図は自車及び周囲の状況が変化した場合に推移する」という仮定を置くことが妥当であるといえる。この仮定より、ドライバーの運転意図は、次の瞬間に運転意図を変えるかどうか、どう変えるのかを、時々刻々、現在の自車及び周囲の状況を基に、現在の運転意図に基づく限られた選択肢の中から選択が行われるという構造が導かれる。この結果は、第 3.2 節で保留した運転意図の選択モデルの構造として、Choudhury[44]が構築したモデルに代表される推移選択型の構造が適していることを示している。また、運転意図の推移をモデル中で明示的に表現することによって、運転意図の変化に影響する要因を直接制御可能なモデル構造を構築できると考えられる。

3.5. 運転意図推移に基づいた統合型車両挙動モデルの枠組み

運転意図に関する考察より、以下の仮定が導かれた。

【仮定】

- a. 異なる車両挙動様態は異なる運転意図によって導かれる
- b. 運転意図は自車及び周囲の状況が変化した場合に推移する

上記の仮定に基づくと、運転意図推移と車両挙動様態の関係は図 3.5 のようになる。図 3.5 では時間経過と共に、ドライバーの運転意図が離散的に定義された複数の運転意図間を推移し、それに伴い車両挙動様態も変化するという枠組みを示している。

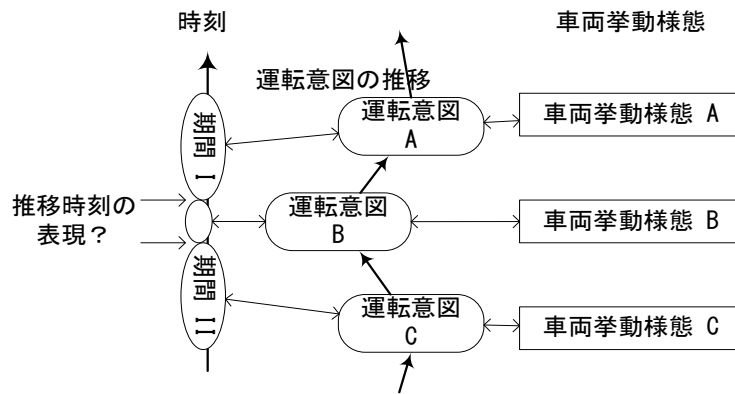


図 3.5 運転意図推移と車両挙動様態の関係

時々刻々の運転意図の推移を表現するために、第 3.2 節で述べた Choudhury[44]が構築したモデルに代表される推移選択型の構造に従い、潜在的な運転意図を仮定し、マルコフ過程によってその推移を表現するモデル構造を導入する。そして、Choudhury が構築したモデル同様、潜在状態の推移によって車線変更時の段階的な選択を表現する。加えて、本研究で構築するモデルでは、この構造をさらに拡張し、運転意図の推移を用いて、車線変更時の段階的な選択を含む、車両挙動様態の変化を表現する。

また、図 3.6 に示すように、モデル中の 1 つの車両挙動様態は、単一の古典的な追従モデル等で記述可能な加減速挙動と単一の車線変更に関する選択結果を示すものとして扱う。具体的には、加速度を出力する「加速度モデル」と、次節で詳述する車線推移に関する状態を示す「走行状態」という離散値によって車両挙動様態が構成されるものとした。よって、本研究で構築するモデルは、時々刻々の周囲の車両との相対距離等の走行環境を入力することで、時々刻々の車両進行方向への加速度値と車線推移を表す走行状態を出力する、速度調整行動と車線変更とを統合したモデルである。この運転意図の推移を考慮し、速度調整行動と車線変更とを統合した車両挙動モデルを、「運転意図推移統合型車両挙動モデル」と呼ぶ。運転意図推移統合型車両挙動モデル中のパラメータは、図 3.6 に示す下位モデルである加速度モデルと、同じく下位モデルである運転意図推移選択モデルにおける効用関数の双方に含まれるパラメータである。これら全てのパラメータは、モデルの入力である時々刻々の走行環境と、モデルの出力である加速度と走行状態の情報を含む車両軌跡を利用して推定される。モデルパラメータの推定結果からは、複数の潜在的な運転意図について、その推移が確率的に表現可能となる。そのため、車両走行軌跡からモデルパラメータ推定を通して確率的に推定された運転意図を「推定運転意図」と呼んでいる。なお、自車及び周囲の状況が大きく変化しない場合には、運転意図は時間的に安定しているという特徴をもつと考えられるため、推移選択において運転意図が変更されない確率は、変更される確率よりも高くなる傾向を示すと予想される。

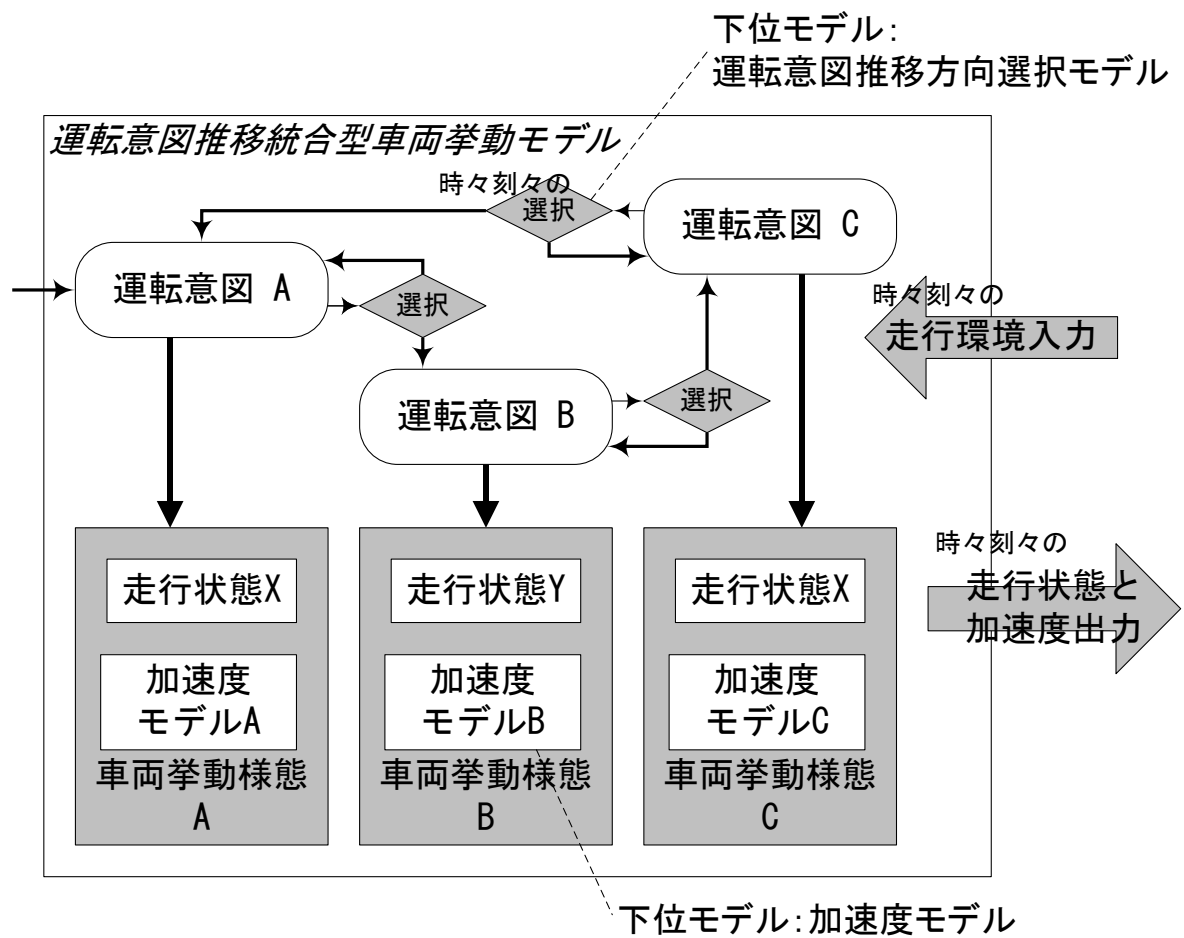


図 3.6 運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組み

運転意図推移統合型車両挙動モデルは走行状態と加速度の観測値から時々刻々の車両挙動が属している潜在クラスとしての推定運転意図を推定できる潜在クラスモデル (LCM) としての構造を持つ。よって、各推定運転意図と車両挙動様態の内容は、モデルパラメータの推定を行うことによって初めて決定される。ただし、各運転意図に対応する走行状態の値と運転意図の数、運転意図間の推移構造に関しては推定前に仮定しておく必要がある。これらの推定前に仮定が必要な各運転意図に対応する走行状態の値と運転意図の数、運転意図間の推移構造を、以降では、まとめて「運転意図推移構造」と呼ぶ。運転意図推移構造はモデルの適用対象と目的に適応した構造を持たせることができる。

図 3.6 では、ドライバーが 3 種類の運転意図を持つと仮定した場合の運転意図推移構造を例に、運転意図推移統合型車両挙動モデルの基本的な枠組みを示した。この枠組みに関して、時々刻々、次の瞬間の運転意図を選択するという構造や、その選択肢に現在の運転意図が必ず含まれているという構造、運転意図から対応する車両挙動様態が導かれるという構造は、想定する運転意図推移構造に関わらず不変であるので、以後、煩雑化を避けるため、図 3.6 における構造の例では図 3.7 のような簡略図を用いて、運転意図推移構造を示す。図 3.7 を例とする簡略図では、運転意図を楕円で表現し、各走行状態に対応する運

転意図をまとめて点線で囲んで示す．さらに異なる運転意図への推移を矢印で表現し，その中でも走行状態の変化を伴わない観測不可能な推移は破線の矢印で示す．

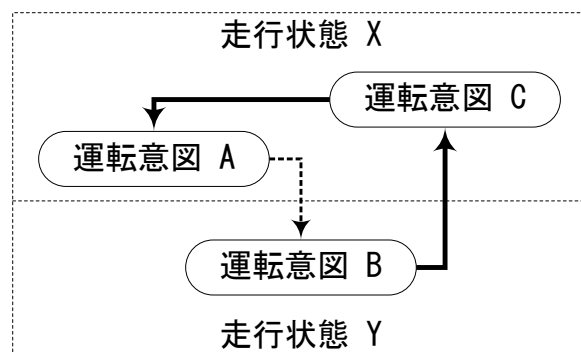


図 3.7 運転意図推移構造の簡略図

3.6. 運転意図推移構造における車線推移の表現

本節では，運転意図推移統合型車両挙動モデルの中の運転意図推移構造によって合流や車線変更といった車線推移を表現する具体的な方法について述べる．

既存研究における車線変更等のモデルは段階的な選択を想定したモデルが多数を占める．その知見を活用できるように，本研究においても車線変更時の段階的な選択を取り扱う．ここで，本研究では車線変更時の段階的な選択に伴って，運転意図が変化すると考える．具体的には，「車線変更をしよう」とドライバーが判断した段階で，ドライバーは車線変更が円滑に遂行できるよう，周囲の車両との位置関係を考慮し，速度等の調整を行うと考える．ドライバーはその後，安全で円滑な車線変更が可能な状況に至った段階において，車線を跨ぐ運転行動に移ると仮定する．この2段階，すなわち，車線変更の準備をする段階と車線を跨いでいく段階を本研究では取り扱う．以降では，前者を車線変更の「準備段階」，後者を「実行段階」と呼び，それ以外の通常の走行を行う「通常走行段階」と区別する．なお，合流する場面においても，合流に対する準備と合流を実行する段階を想定できるため，車円変更同様の取り扱いを考える．そのため，以降では，合流，車線変更に共通した，車線推移の表現方法について述べる．

通常走行段階と車線推移の準備段階，実行段階では，運転意図が異なっていることが容易に想像できる．よって，通常走行段階から準備段階，準備段階から実行段階，加えて実行段階から通常走行段階に戻る時点において，運転意図の特別な推移が存在していると想定した構造を考える．それら特別な推移について模式的に表現した図が図 3.8 である．図 3.8 では簡略化しているが，通常走行段階，準備段階，実行段階の各段階の中でもドライバーは複数の運転意図間の推移構造を持ち得ると考えている．

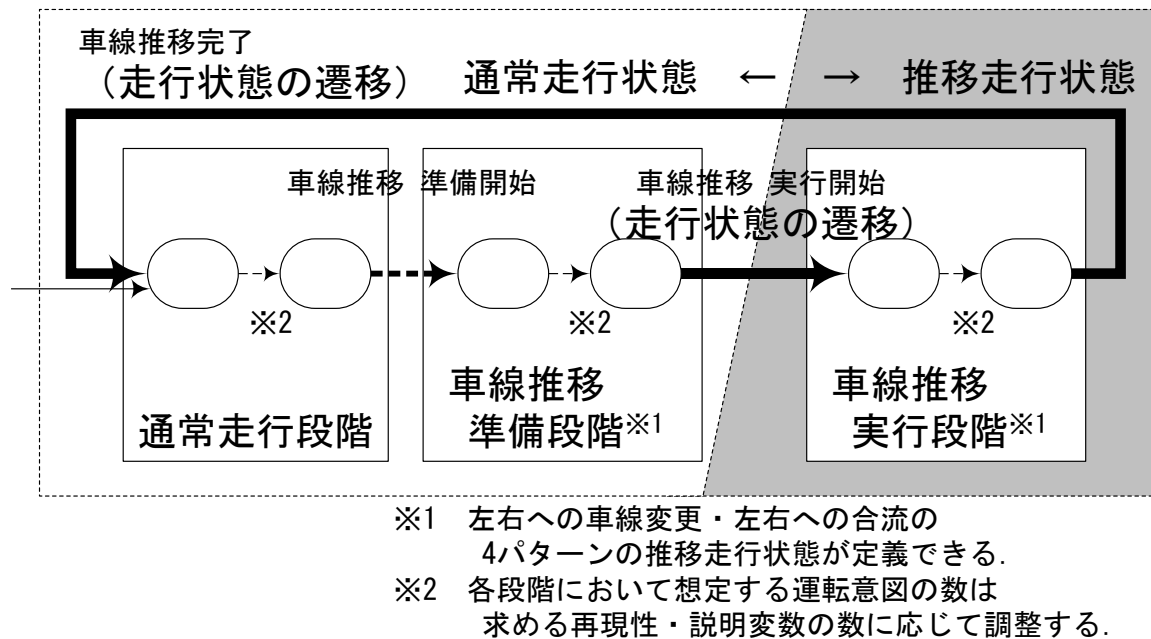


図 3.8 2種類の走行状態と車線推移の段階

通常走行段階から準備段階に移行する段階では、ドライバーは「車線推移をしたい」と判断し、車線推移に備えた運転挙動へ変化すると想定する。この運転意図の推移は、車線推移要求の発生事象といえる。また、準備段階の中では、ドライバーは進入すべき車間の選択等を行っていると考えられ、進入しようとしている車間が変化すれば、運転意図も変化すると想定できる。例えば、直ぐ真横の直近ギャップに進入しようと速度調整を行っている場合の運転意図と、後方のギャップに進入しようと速度調整を行っている場合の運転意図とでは、後者の方が減速傾向の車両挙動様態が導かれると考えられる。これらの運転意図間の推移は、車線推移に関するギャップ選択を表現することに相当する。

準備段階から実行段階へ推移する場面は、ドライバーが隣接車線の車間を評価し、進入すべきギャップ選別が完了させ、「今からハンドルを切って車線を跨いでゆこう」とする場面（Gap Acceptance と呼ばれる場面）に相当し、運転意図の推移時点において車線上における車両の位置関係は車線を跨ぐ方向へ変化し始めると定義する。加えて、実行段階から通常走行段階への運転意図の推移は、車線を跨ぐ方向への車両の移動が終了した時点に相当すると定義する。すなわち、実行段階とは図 3.9 に示すような、車線を跨ぐ方向へ車両の位置が変化している「推移走行状態」に対応する段階として定義し、車線移動に関する走行とは関係のない「通常走行状態」とは異なる状態として扱う。この2種類の車線移動に関する走行状態と車線変更を伴う3つの運転意図の段階との対応関係に関しても図 3.8 で示している。なお、推移走行状態は左車線への車線変更、右車線への車線変更、右方向への合流等を区別して扱い、通常走行状態を含む全ての走行状態は、車両挙動から判別できるものとして取り扱う。

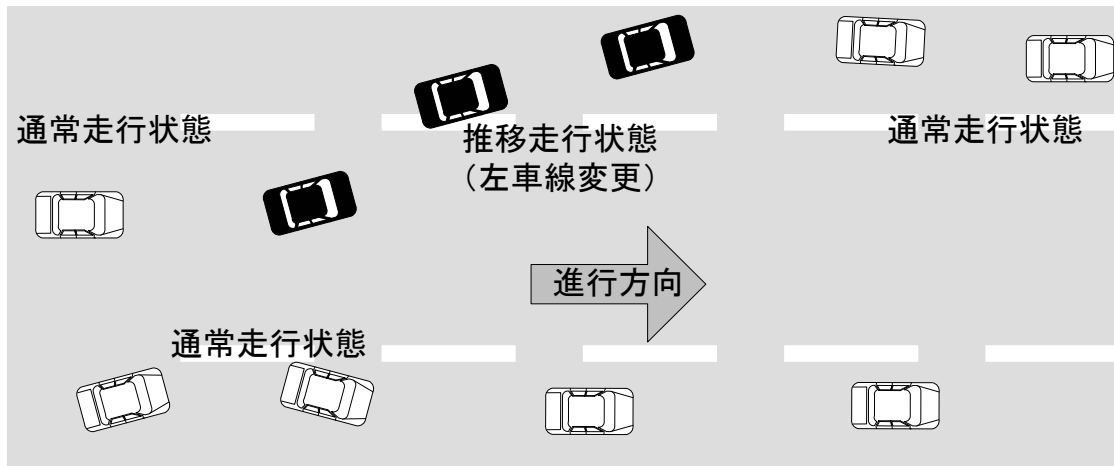


図 3.9 推移走行状態と通常走行状態

結果的に上述の車線変更表現方法を取り入れることによって、時々刻々の走行状態を運転意図と対応づけて考慮することが可能となり、運転意図の推移で、方向も含めた多様な車線間の推移を区別して表現できるモデルが構築可能となる。

3.7. 運転意図推移構造の例

本節では、運転意図推移統合型車両挙動モデルで扱う具体的な運転意図推移構造を仮定した例をモデルの適用状況別に 2 つ挙げ、それぞれの運転意図推移構造に対してモデルパラメータ推定を行った結果として想定される、潜在クラスとしての推定運転意図について概説する。ただし、モデルパラメータ推定の結果に関して、各推定運転意図に対応する状況が必ずしも想定したものとは一致するとは限らない為、推定後に各推定運転意図の内容を再定義する必要が生じる場合がある。

3.7.1. 単路部における追従走行

3.7.1.a. 構造の仮定

まず、最も単純な運転意図の推移について検討するための例として、単路部を追従走行する際の運転意図推移構造の例を取り上げる。具体的には 2 つの運転意図間の相互の推移を仮定した運転意図推移構造を最も単純な例として扱う。なお、この構造では、車線変更を取り扱わないため、考慮する走行状態は通常走行状態のみである。

追従走行中に前方車両に大きな減速が発生する場合は、前方車両との距離が短縮され安全を確保しようという意図を持つ場合が多いと考えられる。また、減速時と加速時のドライバーの反応速度が異なるといった既存研究[19]の主張、アクセルペダルの操作とブレーキペダルの操作という明らかな操作形態の違いを考慮すると、ブレーキペダルを操作する大きな減速の際は、通常とは異なる車両挙動様態となるであろう。よって、一般的な追従

走行を表現するためには、上述した「減速走行」等を含む、少なくとも2つ以上の車両挙動様態を取り扱う必要があると考えられるため、最低限の数である2つの運転意図を扱う運転意図推移構造の例を取り上げる。

3.7.1.b. 想定される推定運転意図

「減速走行」の運転意図を持つ場合を除いた、通常の追従状態等を含む走行に対応する意図を「追従走行」と呼ぶ場合、単路部を追従走行する際の運転意図推移構造に対してはこの2つに近い推定運転意図が潜在クラスとして推定されると想定される。その場合の構造を図3.10に図示する。「減速走行」の際は、前方車両との距離が比較的短い状態であると考えられるため、この例における次の時点の運転意図選択に関して、前方車両との相対距離は無視できない要因であるといえる。

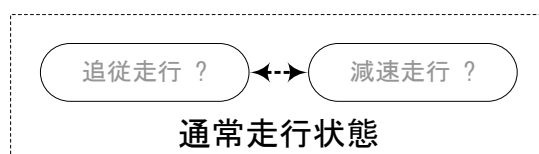


図 3.10 運転意図推移構造の例（単路部の追従走行）

3.7.2. 車線変更を含む高速道路における走行全般

3.7.2.a. 構造の仮定

もう1つの運転意図推移構造の例として、都市高速道路における車両挙動を概ね網羅すると考えられる運転意図推移統合型車両挙動モデルの標準的な運転意図推移構造を図3.11に示す。この例は図3.10で表現される単路部の推移構造を拡張し、図3.8で示した車線変更の表現方法に基づいた運転意図の推移構造を加えたものである。図3.8で示した車線変更の表現方法に従い、車線推移に関する運転意図を大きく3つの段階、すなわち、通常走行段階・準備段階・実行段階に大別している。なお、左右の車線への車線変更と合流に関する運転意図と推移走行状態を区別して扱うことによって、多様な車線間の推移を区別して表現することを可能にしている。これらの4パターンの車線推移に対して、図3.11ではほぼ同様の構造を仮定している。

在化した（潜在クラスではない）運転意図となる。

さらに、車線推移に関する3つの段階の間の運転意図推移に関する仮定について述べる。車線推移をするか否かを考慮している場面は限られており、目的の車線の進入する車間についての検討は車線変更をしようとした後に行うと考えられるため、通常走行段階から車線推移の調整段階への推移は、それぞれの段階の中の中心的な運転意図同士との間の推移のみを仮定する。加えて、左右への車線変更の調整を行っている段階において、車線変更を断念する場合を想定して、通常走行段階へ戻る推移を仮定する。加えて、車線推移の調整段階への推移、通常走行段階に戻る推移に関しても中心的な運転意図間の推移のみを仮定する。

3.7.2.b. 想定される推定運転意図

図 3.11 で示した運転意図推移構造では、通常走行段階において、単路部追従走行について想定した2つの運転意図に加えて「自由走行」に近い推定運転意図が想定される。さらに、中心的な運転意図としては「追従走行」が想定される。これは、「追従走行」と「自由走行」、「追従走行」と「減速走行」の間の推移が多く、前方車両の存在しない、または、前方車両との距離が比較的長い場合の「自由走行」と、前方車両との距離が比較的短い場合の「減速走行」との間には直接の推移が見られないと考えたためである。言い換えれば、「自由走行」から「減速走行」へ、またはその逆方向へ推移する場合、必ず前方車両との相対距離が長すぎず短すぎない状態の「追従走行」となる段階を経由する構造を想定しているといえる。よって、この推移構造において次の瞬間の運転意図選択に関して、前方車両との相対距離は無視できない要因であるといえる。

また、上述した想定では、通常走行段階から車線推移の調整段階への推移は「追従走行」からの推移として表現されていることになる。「自由走行」の意図を持つ場合は前方車両が近くに存在しないため、車線変更を行う動機が少ないと考えられ、また、安全を確保しようと減速している「減速走行」の意図を持つ場合に、同時に車線推移のことを考慮している場面は限られているであろうから、上述した想定は妥当なものであると考えられる。

準備段階の意図としては、ドライバーが運転している車両と進入しようとしているギャップの関係の違いに対応して、「直近ギャップ進入調整」と「前方ギャップ進入調整」、「後方ギャップ進入調整」の3つの運転意図が想定される。「直近ギャップ進入調整」時には、ドライバーは進入先のギャップとの距離が離れないように運転する一方で「前方ギャップ進入調整」、「後方ギャップ進入調整」の時には、それぞれ加速、減速を行い進入先のギャップに近づこうとすると考えられる。そして、車線推移が開始される瞬間には直近ギャップが進入先となっているはずである。従って、車線推移の準備段階から実行段階への推移は、直近ギャップを進入先として考えている運転意図である「直近ギャップ進入調整」からの推移が妥当である。加えて、ギャップ選択の結果として直近ギャップが最も選択され

ている可能性が高いと考えられることから、車線推移の調整段階における中心的な運転意図は「直近ギャップ進入調整」となると想定される。

上述した、図 3.11 で示した推移構造が、運転意図推移統合型車両挙動モデルの標準的な運転意図推移構造であるが、さらに多くの運転意図を考慮することによって、より詳細な解析、及び再現性の高いモデリングが可能となる可能性がある。ただし、多くの運転意図を考慮する場合には、運転意図間の推移を説明する説明変数を増やす必要があり、説明変数と内生変数としての運転意図の増加に伴い、モデルが煩雑になるという欠点も存在する。逆に、いくつかの運転意図をまとめて扱うことにより、より、簡易なモデル構造を構築することも可能である。

3.8. 定式化

モデルの概念に関して前述した運転意図推移統合型車両挙動モデルに関して、本節では、入出力値の計算式及び、パラメータ推定のための尤度関数式を示し、モデルの詳細な定義を行う。

3.8.1. 表記について

まず、運転意図推移統合型車両挙動モデルの定式化の中で扱う変数の一覧、及び、記号等の表記法について示す。

3.8.1.a. 変数一覧

S	: 車線の相対的位置関係を区別した走行状態の全集合
S_t	: 時刻 t において、着目車両がとり得る 実行可能な走行状態の集合（説明変数となる状況変数）
s^i	: 走行状態の値
r_t	: 時刻 t における走行状態を示す変数
a_t	: 時刻 t における加速度を示す変数
t	: 時刻を示すスキャンインターバル単位の値
$\text{lane}^{\text{origin}}(r_t)$: 走行状態 r_t の進行元の車線
$\text{lane}^{\text{target}}(r_t)$: 走行状態 r_t の進行先の車線
$A(S_t)$: 時刻 t において、ドライバーが持ち得る 出現可能な運転意図の集合
$A^{\text{keep}}(r_t)$: 走行状態 r_t の時の車線推移を示唆している場合の 運転意図の集合
$A^{\text{exc}}(r_t)$: 走行状態 r_t の時の車線推移が実行されている場合の 運転意図の集合

$A(r_t, S_t)$: 時刻 t において、走行状態が r_t である場合の 運転意図の集合
A	: 運転意図の全集合
l_t, k_t	: 時刻 t における運転意図を示す変数
$A^{-1}(l_t)$: 運転意図 l_t に対応する走行状態の値を示す関数
β	: パラメータベクトル
γ	: 運転意図推移方向選択モデルの 効用関数パラメータベクトル
η	: 加速度モデルパラメータベクトル
τ	: 遅れ時間パラメータベクトル
$\mathbf{x}_t(\tau)$: 遅れ時間を伴った時刻 t の状況変数ベクトル（説明変数） （ τ で与えられる遅れ時間分、時刻 t から遡った時刻の値）
$P^A(l_t l_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau))$: 運転意図 l_t から l_{t-1} への推移確率を表わす関数
$u^{l_t, l_{t-1}}(\gamma, \mathbf{x}_t(\tau))$: 運転意図 l_t から l_{t-1} への推移効用を表わす関数
$a^{l_t}(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))$: 運転意図 l_t に対応した 時刻 t における車両加速度の推定値を表わす関数
$D^{l_t, l_{t-1}}, D^{l_t}$: 利用パラメータを示すダミー変数行列
T	: 一連の走行の最終時刻
r_t^*	: 時刻 t における走行状態を示す変数（被説明変数）
a_t^*	: 時刻 t における加速度を示す変数（被説明変数）
m	: 一連の走行ごとの番号（0～ M ）
X^{all}	: 観測値の集合
X_m^{all}, X	: 一連の走行の観測値の集合
$L(\beta, X^{\text{all}})$: 全体の対数尤度関数
$L(\beta, X_m^{\text{all}}), L(\beta, X)$: 一連の走行ごとの対数尤度関数
$L^{\text{trans}}(\gamma, *)$: 対数尤度関数の内、走行状態に関する項
$L^{\text{acc}}(\beta, X)$: 対数尤度関数の内、加速度誤差に関する項
$P(l_{1:t}, r_{1:t}^* \gamma, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\tau))$: 一連の運転意図 $l_{1:t}$ と 一連の走行状態 $r_{1:t}^*$ が現れる、 <u>同時確率</u> を表わす関数
A^t	: t 時点分の一連の運転意図が現れる事象の全集合
$\delta^{a,b}$: 一致ダミー

$P^n(l_{1t} \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$: 一連の走行状態 r_{1t}^* が現れる場合に 一連の運転意図 l_{1t} が現れる, <u>条件付き確率</u> を表わす関数
$f^{acc}(\varepsilon)$: 加速度推定誤差 ε に対する確率密度を表わす関数
σ^{acc}	: 加速度標準偏差値 ($\sqrt{2}$ を仮定)
$P(l_t \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$: 一連の走行状態 r_{1t}^* が現れる場合に 時刻 t において運転意図 l_t が現れる, <u>条件付き確率</u> を表わす関数
$L^{HMM}(\beta, X)$: HMM の定義に基づいた対数尤度関数の 加速度誤差に関する項 ※運転意図推移統合型車両挙動モデルのものではない

3.8.1.b. 記号と表記法

本研究の定式化において用いる記号と表記法について、一般に広く用いられていないと考えられるものを一覧で示しておく。また、式の煩雑化を避けるために、2 点の特殊な表記法を用いることとし、本項ではその表記法についても説明する。

・記号と表記法一覧

左辺 := 右辺	: 左辺を右辺で示す内容として, 本研究において定義したことを示す. ※定義からの式変形から導かれる関係式に対しては 通常の間号 (=) を用いる
$\{a a \text{に関する条件}\}$: 条件に合致する要素 a を持つ集合の定義
$\{\text{要素1, 要素2, } \dots, \text{要素}n\}$: 括弧の中に示す n 個の要素を持つ集合の定義
$(\text{要素1, 要素2, } \dots, \text{要素}n)$: 括弧の中に示す n 個の要素を示した順序で持つ 順序付き集合 (列) の定義
$A \oplus B$: 集合 A と B の直和を示す
$f(1:t)$: 1 から t までのスキャンインターバルごとの 時刻の列に対して, 写像 f を適用した列
X	: 一連の走行の観測値の集合 (説明変数・被説明変数)

1 点目の特殊な表記法として、第 3.8.3 項で定義するモデルパラメータを最尤推定する際の入力となる、一連の走行に対する観測値の集合 X を式(3.4)に示すように定義する。以後

の式展開では、観測値のうち運転意図推移統合型車両挙動モデルの被説明変数となる加速度と走行状態は、説明変数としての実行可能な走行状態集合および状況変数は原則区別して扱い、これらを一括してまとめて扱う場合にのみ X により表現する．

$$X := \{a_{1:t}^*, r_{1:t}^*, S_{1:t}, x_{1:t}^*(*)\} \quad (3.4)$$

尤度関数の定式化では、運転意図や観測値を単位時間ごとに並べた列を多数扱う．そのため、特殊な表記法の 2 点目として、列の表記法を式(3.5)のように定義しておく．この式(3.5)の表記法に従うと、全観測時刻の列は式(3.6)、時刻 t までの運転意図、走行状態、状況変数ベクトルの列は、それぞれ式(3.7)、式(3.8)、式(3.9)のように記述できる．

$$f(1:t) := (f(1), f(2), \dots, f(t-1), f(t)) \quad (3.5)$$

$$1:T = (1, 2, \dots, T-1, T) \quad (3.6)$$

$$l_{1:t} = (l_1, l_2, \dots, l_{t-1}, l_t) \quad (3.7)$$

$$r_{1:t}^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_{t-1}^*, r_t^*) \quad (3.8)$$

$$x_{1:t} = (x_1, x_2, \dots, x_{t-1}, x_t) \quad (3.9)$$

3.8.2. 運転意図推移統合型車両挙動モデルの定式化

3.8.2.a. モデルの概要

本項では、第 3.5 節で述べた、図 3.12 に示す運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みを定義するモデル式について述べる．

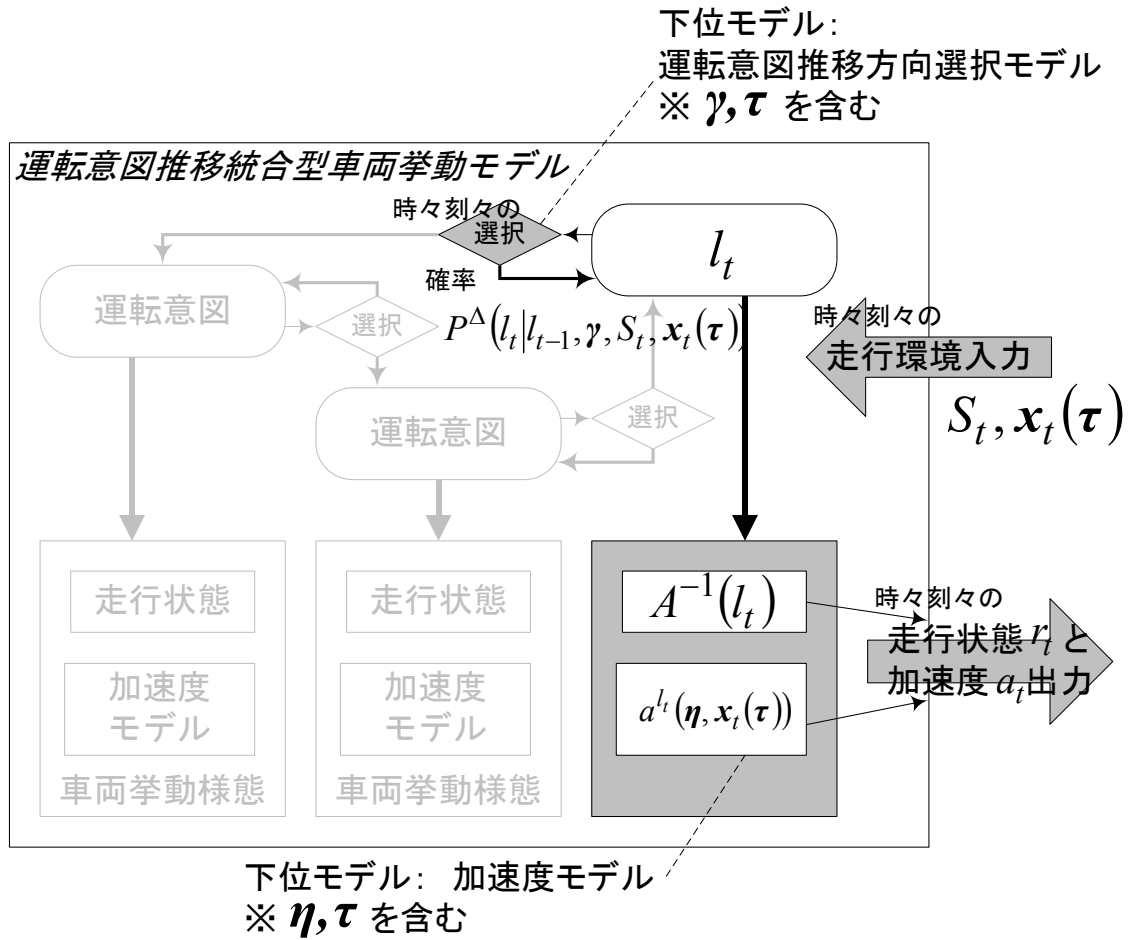


図 3.12 運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みとモデル式

運転意図推移統合型車両挙動モデルに基づいた車両挙動計算を行う上で値を定める必要があるモデルパラメータ β は式(3.10)に示すように、下位モデルである運転意図推移方向選択モデルの効用関数に含まれる γ と、加速度モデルに含まれる η 、遅れ時間を表す τ で構成される。

$$\beta := \{\gamma, \eta, \tau\} \quad (3.10)$$

本モデルは時刻 t における走行状態 r_t と加速度 a_t 、および潜在状態としての運転意図 l_t を、時刻 $t-1$ における運転意図 l_{t-1} と、時刻 t において対象車両が置かれている状況を表す状況変数 $S_t, x_t(\tau)$ から算出するモデルである。よって、時刻 t におけるすべての対象車両に対して、次の時刻 $t+1$ における状況変数 $S_{t+1}, x_{t+1}(\tau)$ が算出可能である限り、継続的な車両挙動と運転意図が出力可能である。一方で、初期値として、時刻 1 における走行状態と加速度、運転意図 l_1 、状況変数 $S_1, x_1(\tau)$ を入力として与える必要がある。

なお、状況変数 $x_t(\tau)$ は対象車両の車線に沿った位置、速度、および、周囲の車両との相対距離、相対速度等の値であり、 τ で与えられる遅れ時間分、時刻 t から遡った時刻の

値を用いる．この状況変数 $\mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})$ に含まれる値は，運転意図推移統合型車両挙動モデルの下位モデルである運転意図推移方向選択モデルの効用関数と加速度値の推定関数に説明変数として含まれる値であり，下位モデルが簡易であるほど必要となる状況変数は少なくなる．また，状況変数 $\mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})$ には，パラメータ $\boldsymbol{\tau}$ に対応した遅れ時間を考慮し，時刻 t 以前の状態を表す値も含まれるものとする．

また， S_t は時刻 t における周囲の進入可能な車線等を示す走行状態の集合であり，各時刻ごとに，式(3.11)，(3.12)のように定義する．第 3.6 節で述べたように車線推移自体を表す走行状態は車線変更・合流の区別，左右の区別を行うことによって，同時に複数の推移先を扱うことを可能としている．走行状態の全集合を S として定義し，推移先の車線が存在しない場合を除いた部分集合 S_t を各時刻ごとのモデルの入力とすることで，存在しない車線への移動の考慮を除外している．式(3.13)で示すように部分集合 S_t には通常走行状態に対応する走行状態 s^0 が 1 つと，複数の推移走行状態 s^n が含まれるものとして定義する．なお， $\text{lane}^{\text{origin}}(*)$ と $\text{lane}^{\text{target}}(*)$ の 2 つの関数の値は，物理的に連続した各車線を区別して指し示す値である．

$$S_t \subseteq S \quad (3.11)$$

$$S_t := \{r_t \mid \text{lane}^{\text{target}}(r_t) \text{ exists at } t \cup r_t \in S\} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} S_t &= \{s^0, s^1, \dots, s^N\} \\ \text{s.t.} \\ \text{lane}^{\text{origin}}(s^0) &= \text{lane}^{\text{target}}(s^0) \\ \text{lane}^{\text{origin}}(s^n) &\neq \text{lane}^{\text{target}}(s^n) \quad \forall n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3.13)$$

例えば，追越車線を走行している場合，左の走行車線への推移のみが可能であるため，部分集合 S_t は図 3.13 に示すように，2 つの走行状態をその要素として持つ．

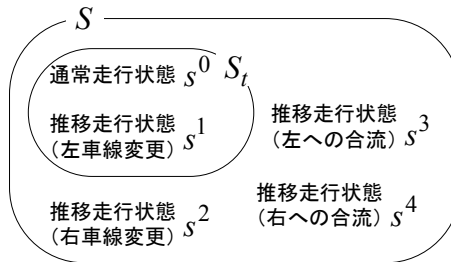


図 3.13 走行状態の集合関係（左の走行車線への推移のみが可能）

3.8.2.b. 運転意図の算出式

時刻 t における走行状態と加速度は、同時刻の運転意図 l_t に依存するため、まず、運転意図 l_t の算出式について記述する。

時刻 t における運転意図 l_t は、時刻 $t-1$ における運転意図 l_{t-1} と状況変数 $S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})$ に依存した離散選択結果として算出される。この選択は式(3.14)で定義される LOGIT 型の離散選択確率に従って行われる。

$$P^A(l_t | l_{t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) := \begin{cases} \frac{\exp(u^{l_t, l_{t-1}}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})))}{\sum_{k_t \in A(S_t)} \exp(u^{k_t, l_{t-1}}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})))} & \text{if } l_t \in A(S_t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\forall l_t, \forall l_{t-1} \in A$$

離散選択確率の算出に用いられる各効用関数は式(3.15), (3.16)で表わされる線形式として定義した。 $D^{l_t, l_{t-1}}$ は効用関数 $u^{l_t, l_{t-1}}$ におけるパラメータ $\boldsymbol{\gamma}$ と説明変数 $\mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})$ の対応行列であり、運転意図推移構造中において運転意図 l_t から l_{t-1} への想定されていない推移、例えば、図 3.11 中において矢印のない推移に対しては $D^{l_t, l_{t-1}}$ が定義されず、効用関数 $u^{l_t, l_{t-1}}$ の値が $-\infty$ になるよう定義している。

$$u^{l_t, l_{t-1}}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) := \begin{cases} \boldsymbol{\gamma} D^{l_t, l_{t-1}} \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau}) & \text{if } D^{l_t, l_{t-1}} \text{ is defined} \\ -\infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\{D^{l_t, l_{t-1}}\}_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if use parameter } \{\boldsymbol{\gamma}\}_i \text{ with } \{\mathbf{x}\}_j \text{ in } u^{l_t, l_{t-1}}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{x}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.16)$$

また、式(3.14)に示すように選択肢集合は、式(3.17)のように複数の運転意図集合の直和集合として定義される、実行可能な走行状態の集合 S_t に対する出現可能な運転意図の集合 $A(S_t)$ である。そして、定式化の便宜上選択肢集合に含まれない運転意図への推移確率を 0 として定義している。

$$A(S_t) := A^{\text{keep}}(s^0) \oplus A^{\text{keep}}(s^1) \oplus \dots \oplus A^{\text{keep}}(s^N) \oplus A^{\text{exe}}(s^1) \oplus \dots \oplus A^{\text{exe}}(s^N) \quad (3.17)$$

左右の車線への推移が可能な状況を例にとると、図 3.14 のように実行可能な走行状態 3 つに対応して、出現可能な運転意図の集合 $A(S_t)$ が定義される。

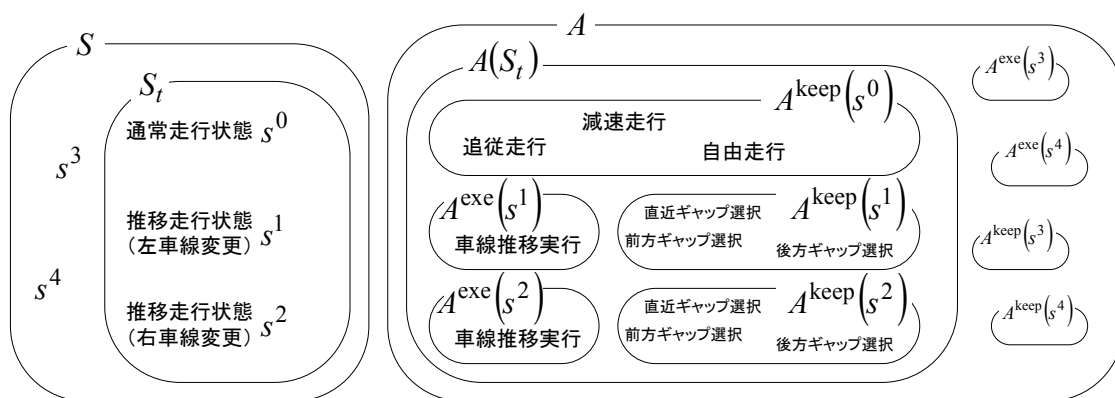


図 3.14 運転意図の集合関係（左右の車線への推移が可能）

3.8.2.c. 走行状態の算出式

上述の離散選択結果としての運転意図 l_i に応じて、時刻 t における走行状態と加速度が算出される．そのうち、走行状態は式(3.21)に従う値 $A^{-1}(l_i)$ として算出される．この出現可能な運転意図の集合 $A(S_i)$ の要素 l_i に関する走行状態への写像 A^{-1} は式(3.19)，式(3.20)で定義される．式(3.19)では s_i に含まれる走行状態 r_i に対応する運転意図の集合を定義している．この定義にしたがうと、 $A^{-1}(l_i)$ の値は、場合分けした形で式(3.21)のように表すことができる．例えば、図 3.14 の例における写像 A^{-1} は図 3.15 の中の矢印で示した関係を表わす．

$$l_t \in A(S_t) \tag{3.18}$$

$$A(r_t, S_t) := \begin{cases} \sum_{k \in S_t} A^{\text{keep}}(k) & \text{if } r_t = s^0 \\ A^{\text{exe}}(r_t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
A^{-1}: A(S_t) &\rightarrow S_t \\
l_t &\mapsto s = A^{-1}(l_t) \\
s.t. \\
A(r_t, S_t) &= \{l_t \mid A^{-1}(l_t) = r_t\}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$A^{-1}(l_t) = \begin{cases} s^n & \text{if } l_t \in A^{\text{exe}}(s^n) \exists n \neq 0 \\ s^0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.21}$$

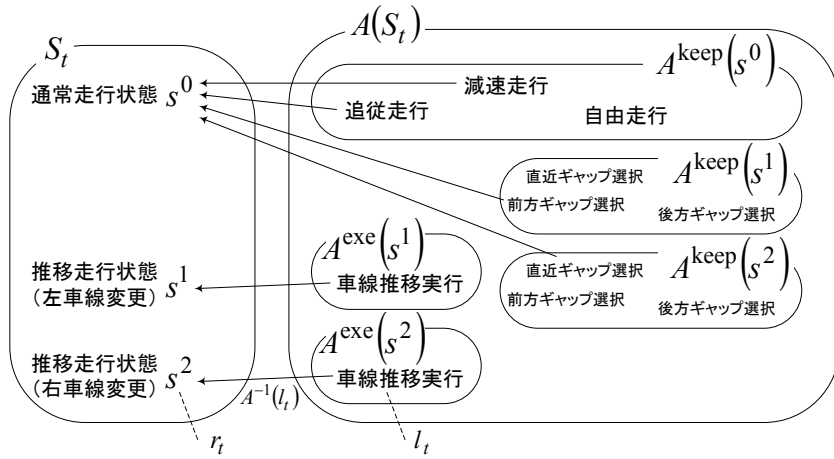


図 3.15 運転意図の集合関係と写像 A^{-1} （左右の車線への推移が可能）

3.8.2.d. 加速度の算出式

一方，加速度に関しては，各運転意図 l_t に対応した，式(3.22)，(3.23)で定義される線形式で算出されるものとして定義する．

$$a^{l_t}(\eta, \mathbf{x}_t(\tau)) := \eta D^{l_t} \mathbf{x}_t(\tau) \tag{3.22}$$

$$\{D^{l_t}\}_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if use parameter } \{\eta\}_i \text{ with } \{\mathbf{x}\}_j \text{ in } a^{l_t}(\eta, \mathbf{x}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.23}$$

3.8.2.e. モデルの入出力

結局，運転意図推移統合型車両挙動モデルは，図 3.7 に示すように，状況変数 $S_t, \mathbf{x}_t(\tau)$ を入力として持ち，潜在状態である運転意図 l_t を推移確率 $P^\Delta(l_t | l_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau))$ に基づいて決定，その運転意図 l_t に基づく，式(3.24)で表現される走行状態 γ と加速度 $a^{l_t}(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))$ を出力

するモデルとして定義される．

$$\begin{aligned} a_t &= a^{l_t}(\eta, \mathbf{x}_t(\tau)) \\ r_t &= A^{-1}(l_t) \end{aligned} \quad (3.24)$$

3.8.2.f. 運転意図と走行状態の集合

第 3.8.2 項で述べた，運転意図の全集合 A と，上述した $A(S_t)$ ， $A(r_t, S_t)$ の集合関係をまとめると，式(3.25)のようになり， s ， s_t ， r_t の集合関係に対応した部分集合の関係があることがわかる．

$$A(r_t, S_t) \subseteq A(S_t) \subseteq A \quad (3.25)$$

以降では，第 3.7 節で例示した，運転意図推移構造の例 2 つの中で扱った，各走行状態と運転意図と，上述の定式化の中の要素との対応関係を示す．

まず，図 3.10 に示す単路部における追従走行を想定した運転意図推移構造の例では，単純な対応関係が式(3.26)のように表現される．

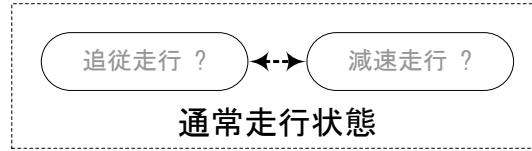


図 3.10 再掲：運転意図推移構造の例（単路部の追従走行）

$$\begin{aligned} S &= S_t = \{\text{通常走行状態}\} \\ r_t &\equiv s^0 = \text{通常走行状態} \\ A &\equiv A(S_t) = A^{\text{keep}}(s^0) = \{\text{追従走行, 減速走行}\} \quad \forall t \end{aligned} \quad (3.26)$$

一方，図 3.11 に示す車線推移を伴う場合の運転意図推移構造の例では，式(3.27)に示す 5 つの走行状態と，式(3.28)，式(3.29)に示す運転意図を取り扱う．通常走行段階の運転意図が通常走行，自由走行，減速走行の 3 つ．準備段階には，左右車線変更・合流の 4 つの推移走行状態に対して，直近ギャップ進入調整，前後ギャップ進入調整の 2 つの運転意図が存在し，車線推移実行段階に対しても 4 つの推移走行状態に対応した運転意図を含む．合計で $3+(3+1) \times 4 = 19$ の運転意図を含む運転意図推移構造となっている．

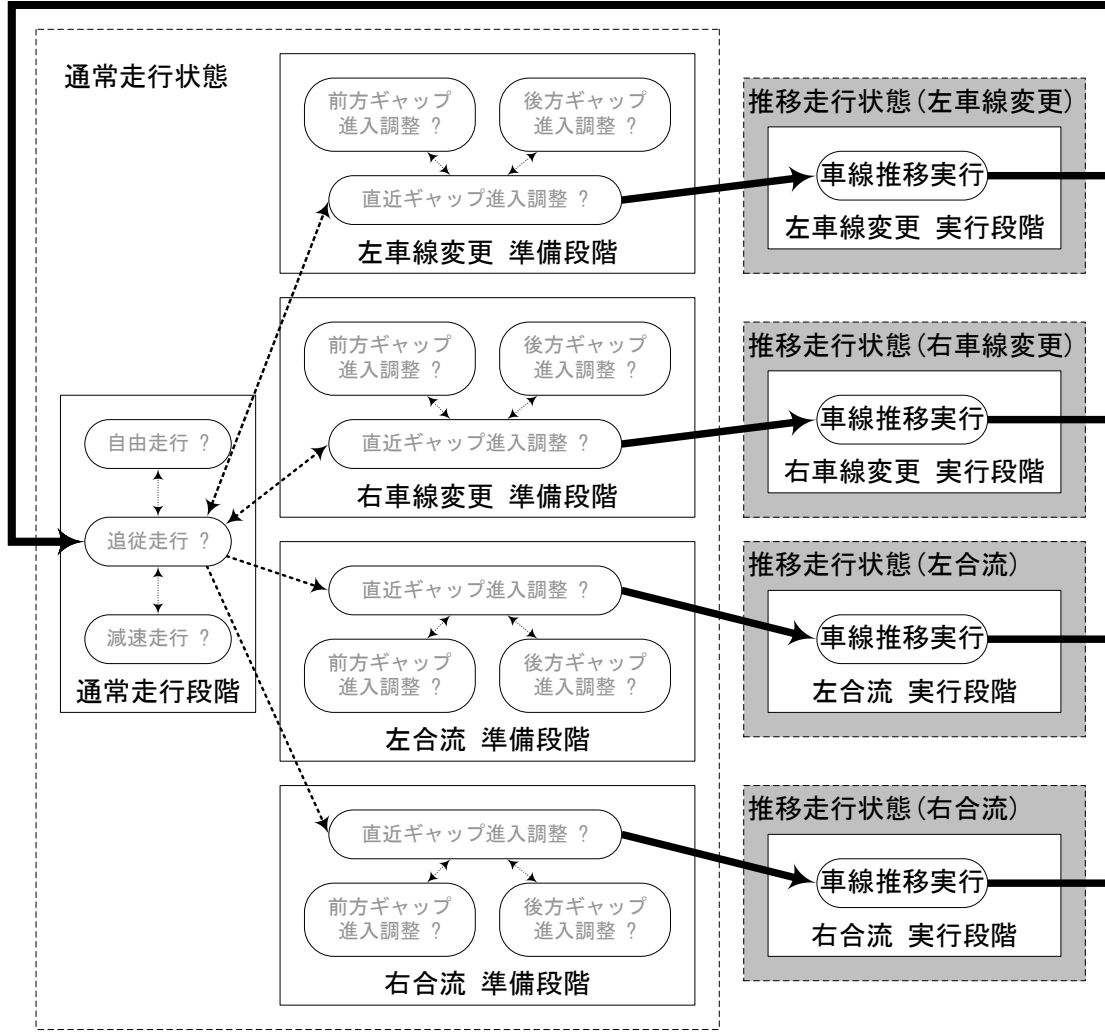


図 3.11 再掲：運転意図推移構造の例（車線変更を含む走行全般の標準構造）

$$S = \begin{cases} \text{通常走行状態} \\ \text{推移走行状態(左車線変更)} \quad \text{推移走行状態(左合流)} \\ \text{推移走行状態(右車線変更)} \quad \text{推移走行状態(右合流)} \end{cases} \quad (3.27)$$

$s^0 = \text{通常走行状態}$

$$A^{\text{keep}}(r_t) = \begin{cases} \{\text{追従走行, 自由走行, 減速走行}\} & \text{if } r_t = s^0 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{lane}^{\text{target}}(r_t) \text{への} \quad \text{lane}^{\text{target}}(r_t) \text{への} \\ \text{直近ギャップ進入調整} \quad \text{前後ギャップ進入調整} \end{array} \right\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.28)$$

$$A^{\text{exe}}(r_t) = \begin{cases} \text{lane}^{\text{target}}(r_t) \text{への} \\ \text{車線推移実行} \end{cases} \quad (3.29)$$

3.8.3. 尤度関数の定義式

本項では，運転意図推移統合型車両挙動モデル中の全てのモデルパラメータ β を一括して最尤推定するための対数尤度関数について記述する．

3.8.3.a. 尤度関数全体

式(3.14)～(3.24)で示されたパラメータ γ, η, τ は，式(3.30)に示す尤度を最大化する最尤推定によって求める．式(3.30)では対数尤度が一連の走行ごとに定義され，その和として全体の対数尤度が定義されることを示している．

$$L(\beta, X^{\text{all}}) := \sum_{m=1}^M L(\beta, X_m^{\text{all}}) \quad (3.30)$$

観測された一連の走行に対する対数尤度は，一連の運転意図が示す走行状態が観測値に合致するかどうかを表わす項と，加速度が観測値に合致するかどうかを表わす項の和として式(3.31)のように定義する．式(3.31)の右辺第 1 項が走行状態，第 2 項が加速度に関する項を各々表している．なお，以後の式では一連の走行ごとの違いを識別してはいない．

$$L(\beta, X) := L^{\text{trans}}(\gamma, r_{1:T}^*, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\tau)) + L^{\text{acc}}(\beta, X) \quad (3.31)$$

3.8.3.b. 走行状態に関する項

一連の運転意図が示す走行状態が観測値に合致するかどうかを表わす項は，一連の運転意図を示す事象 $l_{1:T}$ と一連の観測された走行状態を示す事象 $r_{1:T}^*$ が現れる同時確率

$P(l_{1:T}, r_{1:T}^* | \gamma, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\tau))$ の，各事象 $l_{1:T}$ に対する値の和として表現され，その対数をとって

式(3.32)の通りに定義される．この同時確率は式(3.33)，式(3.34)の漸化式で定義され，結局，一連の運転意図が示す走行状態が観測値に合致する場合は，式(3.14)で定義した推移確率の積，合致しないものは 0 となり，式(3.32)の値は一連の走行状態が観測値に合致する確率の和として定義されている．走行状態の合致の判別は，各時刻 t における，運転意図 l_t に対応する走行状態 $A^{-1}(l_t)$ と，観測された走行状態 r_t^* が一致しているか否かによって行い，式(3.35)で定義されるダミー変数によって尤度に反映させている．また，式(3.32)における一連の運転意図推移事象 $l_{1:T}$ は， T 時点分の列の要素に対して，各運転意図が相当している運転意図推移列の集合の元である．よって，仮に運転意図全集合における要素の数を n とすると，考慮する運転意図推移事象の数は， n^T となる．この運転意図推移事象に関して， t 時点分の全集合を A^t と表記する．

$$L^{\text{trans}}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_{1:T}^*, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\boldsymbol{\tau})) := \ln \left(\sum_{l_{1:T} \in A^T} P'(l_{1:T}, \mathbf{r}_{1:T}^* | \boldsymbol{\gamma}, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\boldsymbol{\tau})) \right) \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} & P'(l_{1:t}, \mathbf{r}_{1:t}^* | \boldsymbol{\gamma}, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\boldsymbol{\tau})) \\ &:= \delta^{A^{-1}(l_t), \mathbf{r}_t^*} \times P^\Delta(l_t | l_{1:t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) \times P'(l_{1:t-1}, \mathbf{r}_{1:t-1}^* | \boldsymbol{\gamma}, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\boldsymbol{\tau})) \\ & \quad \forall l_{1:t} \in A^t \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} & P'(l_{1:1}, \mathbf{r}_{1:1}^* | \boldsymbol{\gamma}, S_{1:1}, \mathbf{x}_{1:1}(\boldsymbol{\tau})) \\ &:= P'(l_1, \mathbf{r}_1^*) \\ &:= \delta^{A^{-1}(l_1), \mathbf{r}_1^*} / \sum_{k_1 \in A} \delta^{A^{-1}(k_1), \mathbf{r}_1^*} \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\delta^{a,b} = \begin{cases} 1 & \text{if } a = b \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.35)$$

3.8.3.c. 加速度に関する項

加速度が観測値に合致するかどうかを表わす項は、各時点における加速度残差の確率密度の積の対数として定義する。ただし、一連の加速度は運転意図推移に依存しているため、式(3.36)のように一連の運転意図推移事象 $l_{1:T}$ ごとに、加速度残差の確率密度 $f^{\text{acc}}(a_t^* - a^t(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})))$ の積の対数に対して、一連の運転意図推移事象の生起確率 $P'(l_{1:T} | \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_{1:T}^*, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\boldsymbol{\tau}))$ で重み付けをし、その和として加速度に関する項を定義している。

このときの重みとなる事象の生起確率は式(3.37)で定義される、一連の走行状態 $\mathbf{r}_{1:T}^*$ で条件づけされた生起確率である。式(3.37)からわかるように重みの総和は1である。また、加速度誤差の確率密度は式(3.38)に示した通りに、正規分布に従うと仮定しており、加速度の推定値と観測値との差の絶対値に対して単調減少する。したがって、少なくとも1つ以上の加速度の推定値と観測値の差の絶対値が減少しなければ、尤度が増加しない構造として定義されている。

$$L^{\text{acc}}(\boldsymbol{\beta}, X) := \sum_{l_{1:T} \in A^T} P'(l_{1:T} | \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_{1:T}^*, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\boldsymbol{\tau})) \ln \left(\prod_{t=1}^T f^{\text{acc}}(a_t^* - a^t(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau}))) \right) \quad (3.36)$$

$$P''(l_{1t} | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau)) := \frac{P'(l_{1t}, r_{1t}^* | \gamma, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))}{\sum_{k_{1t} \in A^T} P'(k_{1t}, r_{1t}^* | \gamma, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))} \quad (3.37)$$

$$\forall l_{1t} \in A^t$$

$$f^{\text{acc}}(\varepsilon) := \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\varepsilon^2}{\sigma^{\text{acc}^2}}\right) \quad (3.38)$$

3.8.4. 尤度関数の HMM との比較

運転意図推移統合型車両挙動モデルにおける尤度関数の加速度に関する項は、HMM の枠組みに従った場合と構造上異なっており、加速度モデルに関するパラメータの推定計算方法の変更が試みられている。本項では、構造上の相違点とその相違が推定パラメータに与える影響について述べる。

HMM の枠組みに従った場合、加速度に関する項は式(3.39)に示すように定義される。HMM では式(3.39)の一行目のように、各時点の各内生変数に対して被説明変数である加速度残差の確率密度と、潜在状態の生起確率の積を求め、各時点において生起しやすさの和を求める。この定義を、一連の内生変数の列の生起しやすさの和に変形したものが二行目である。式(3.36)で示した運転意図推移統合型車両挙動モデルの対数尤度関数の加速度に関する項と比較すると、潜在状態の生起確率 $P''(l_{1T} | \gamma, r_{1T}^*, S_{1T}, \mathbf{x}_{1T}(\tau))$ で重み付けするのが、一連の加速度の生起しやすさ $\prod_{t=1}^T f^{\text{acc}}(a_t^* - a^t(\eta, \mathbf{x}_t(\tau)))$ そのものか、その対数であるかの違いがあることがわかる。

$$L^{\text{HMM}}(\beta, X) = \ln \left(\prod_{t=1}^T \sum_{l_t \in A} P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau)) f^{\text{acc}}(a_t^* - a^t(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))) \right) \quad (3.39)$$

$$= \ln \left(\sum_{l_{1T} \in A^T} P''(l_{1T} | \gamma, r_{1T}^*, S_{1T}, \mathbf{x}_{1T}(\tau)) \prod_{t=1}^T f^{\text{acc}}(a_t^* - a^t(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))) \right)$$

結局、尤度を最大化する時の、潜在状態の生起確率 $P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$ ，すなわち、最尤パラメータを用いて計算される潜在状態の生起確率は、加速度誤差に関する関数との積を最大化するよう、合計 1 の値が各運転意図推移事象 l_{1t} に対して分割される。HMM に対して、運転意図推移統合型車両挙動モデルは対数値を取った値が加速度誤差に関する関数

となっており、加速度誤差に対する関数値の変化率が異なる．よって、その変化率が大きい場合は、対応して潜在状態の生起確率 $P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$ の値の大小の差が大きくなる傾向を示し、加速度誤差の大小の差が小さくなると考えられる．ただし、加速度誤差が小さくなれば生起確率は大きくなるなどの、加速度誤差と生起確率との大小関係の傾向は局所的には同じである．また、各時刻において生起確率が最大となる潜在状態の項の値が卓越した場合、すなわち、全体の尤度が限りなく大きくなる場合には双方のモデルの尤度の値が漸近する．以上のことから推定されるモデルパラメータの傾向はほぼ一致すると言える．なお、式(3.39)は、以下の式(3.40)で定義される確率を用いて表現した．

$$P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau)) := \frac{P'(l_t, r_{1t}^* | \gamma, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))}{\sum_{k_{1t} \in A^t} P'(k_{1t}, r_{1t}^* | \gamma, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))} \quad (3.40)$$

$\forall l_t \in A$

式(3.40)では、時刻 t において運転意図 l_t が現れる確率を、一連の走行状態 r_{1t}^* で条件づけた確率を定義している．なお定義より、式(3.40)で定義される確率に対しては、式(3.41)で表現される漸化式が導かれる．

$$P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau)) = \delta^{A^{-1}(l_t), r_t^*} \times \sum_{k_{t-1} \in A} P^A(l_t | k_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau)) P(k_{t-1} | \gamma, r_{1t-1}^*, S_{1t-1}, \mathbf{x}_{1t-1}(\tau)) \quad (3.41)$$

$\forall l_t \in A$

3.8.5. 尤度関数の計算式

本項では、尤度関数の定義式を変形し、走行状態に関する項を効率的に算出するための計算式、および、加速度に関する項のパラメータを重み付き重回帰によって算出するための計算式について記述する．

まず、式(3.40)、式(3.41)を用いると、式(3.42)で表現される、時刻 t において運転意図 l_t が現れる条件付き確率に対する漸化式を導くことができる．この漸化式は、運転意図 l_t に対する確率 $P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$ 以外は、観測変数から直接算出可能な関数で記述されており、時々刻々の時刻に対応する確率 $P(l_t | \gamma, r_{1t}^*, S_{1t}, \mathbf{x}_{1t}(\tau))$ を順次計算できる形となっている．

$$\begin{aligned}
& P(l_t | \gamma, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\tau)) \\
&= \frac{\delta^{A^{-1}(l_t), r_t^*} \sum_{l_{t-1} \in A} P^\Delta(l_t | l_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau)) P(l_{t-1} | \gamma, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\tau))}{\sum_{k_t \in A} \delta^{A^{-1}(k_t), r_t^*} \sum_{k_{t-1} \in A} P^\Delta(k_t | k_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau)) P(k_{t-1} | \gamma, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\tau))} \quad (3.42)
\end{aligned}$$

$$P(l_1 | \gamma, r_{1:1}^*, S_{1:1}, \mathbf{x}_{1:1}(\tau)) = \delta^{A^{-1}(l_1), r_1^*} / \sum_{k_1 \in A} \delta^{A^{-1}(k_1), r_1^*} \quad (3.43)$$

式(3.42), 式(3.43)で表現される確率を用いると, 走行状態, 加速度それぞれに関する項は, 式(3.44), 式(3.45)へ変形することができる. 運転意図 l_t に対する確率

$P(l_t | \gamma, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\tau))$ は式(3.42), 式(3.43)で表現される漸化式から順次計算が可能であり,

走行状態に関する項は式(3.42)の左辺の分母の和を取ることで効率的に算出可能である. また, 式(3.45)より, 加速度に関しては, パラメータ β の内, 推定加速度 $a^l(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))$ に線形式としてのみ利用されているパラメータ η に関して, 重み付き重回帰を適用することによって部分的に尤度を最大化することが可能であることがわかる. すなわち, 推定加速度 $a^l(\eta, \mathbf{x}_t(\tau))$ に線形式として含まれるパラメータ以外のパラメータ τ と重みを計算するために必要なパラメータ γ が定まれば, 線形式として含まれるパラメータ η は重み付き重回帰によって一意に定まることを意味する. 重回帰における重みは, 運転意図 l_t に対する確率 $P(l_t | \gamma, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\tau))$ であり, 運転意図 l_t ごとに利用されているパラメータが異なれば, 運転意図 l_t ごとに別々の下位問題としての重み付き重回帰問題として処理できる.

$$L^{\text{trans}}(\beta, X) = \ln \left(\prod_{t=2}^T \sum_{l_t \in A} \delta^{A^{-1}(l_t), r_t^*} \sum_{l_{t-1} \in A} \left(\frac{P^\Delta(l_t | l_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau))}{\sum_{k_t \in A} \delta^{A^{-1}(k_t), r_t^*} \sum_{k_{t-1} \in A} P^\Delta(k_t | k_{t-1}, \gamma, S_t, \mathbf{x}_t(\tau)) P(k_{t-1} | \gamma, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\tau))} \right) \right) \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned}
& L^{\text{acc}}(\beta, X) \\
&= -\frac{1}{2\sigma^{\text{acc}2}} \sum_{t=1}^T \sum_{l_t \in A} P(l_t | \gamma, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\tau)) (a_t^* - a^l(\eta, \mathbf{x}_t(\tau)))^2 \quad (3.45)
\end{aligned}$$

結局、式(3.30)の尤度を最大化する問題は、式(3.44)、式(3.45)を用いて重み付き重回帰問題を下位問題として内包する、式(3.46)で表現される問題として扱うことが可能である。式(3.46)では、右辺の第二項が重み付き重回帰問題となっている。なお、式(3.46)では、各一連の走行ごとに定義される変数は添え字 m をつけて表現している。

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\beta}} L(\boldsymbol{\beta}, X^{\text{all}}) \\ & \equiv \max_{\boldsymbol{\beta}} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=2}^T \sum_{l_{m,t} \in A} \ln \left(\delta^{A^{-1}(l_{m,t}), r_{m,t}^*} \sum_{l_{m,t-1} \in A} \left(P^A(l_{m,t} | l_{m,t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_{m,t}, \mathbf{x}_{m,t}(\boldsymbol{\tau})) \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. \times P(l_{m,t-1} | \boldsymbol{\gamma}, r_{m,1:t-1}^*, S_{m,1:t-1}, \mathbf{x}_{m,1:t-1}(\boldsymbol{\tau})) \right) \right) \right) \right) \\ & \quad \left(- \frac{1}{2\sigma^{\text{acc}2}} \min_{\boldsymbol{\eta}} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{l_{m,t} \in A} P(l_{m,t} | \boldsymbol{\gamma}, r_{m,1:t}^*, S_{m,1:t}, \mathbf{x}_{m,1:t}(\boldsymbol{\tau})) (a_{m,t}^* - a^{l_{m,t}}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}_{m,t}(\boldsymbol{\tau})))^2 \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

本章で定義した尤度関数は厳密な凸関数ではないため、尤度最大化問題は厳密な尤度の最大値ではなく、極所最大値を求める問題として扱うことで、パラメータの推定を行う。このような計算には、一般的にパラメータの数が増え、自由度が増加するほど収束に時間がかかり、計算結果も想定とは大きく異なるものとなる傾向がある。ただし、本モデルは一部のパラメータを下位問題としての重み付き重回帰によって一意に定めることが可能となっており、問題の自由度を抑えることによって、収束計算の効率化を図っている。さらに、下位問題の重み付き重回帰問題によって算出されるパラメータに関しては、適合度等の重回帰に付随している、計算結果の解釈の助けとなる情報を得ることができる。なお、式(3.46)に基づいた、尤度関数、及び、パラメータの最尤推定の詳細な計算アルゴリズムについては、パラメータの推定を実車両軌跡データを用いて行う第4章において説明する。

3.9. 既存モデルとの比較

第2章で示した、既存の追従モデル等の加速度を表現するモデル、Gap Acceptance モデル等の車線変更に関するモデルを用いて車両挙動全般を表現する場合、何らかのルールに基づいて、複数の車両挙動様態に対応する各モデルを決定する必要がある。しかし、これまでのモデルの適用では、どのモデルをどの車両挙動様態に対応づけるか、どの場面で用いるかは、ad hoc な方法で定めたものが多く、統計的な根拠を示しつつ、そのルールやその中の閾値を明示的に定めることは難しかった。そこで、本章では、複数の車両挙動様態に対応する車両挙動モデルを、最尤推定という統計手法によって決定するルールを内包した運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みを構築した。

表 3.1 に第2章で示した既存のモデルと本モデルの構造を表現する簡易な式を示す。表では、既存の主なモデルについて、車両やドライバーの状態をモデルの中でどのように取り扱っているのかということに着目している。B の Gap Acceptance モデルは次の時点にお

いて、車両が車線変更を始めているか否かを選択するモデルであると捉えることができ、その枠組みを車線変更を予定しているか否か、車線変更する際にどの車間に進入するかなどの、複数段階の選択へと拡張した C の Toledo[42]に代表されるモデルがある。D の Choudhury[44]のモデルはこの時々刻々状態を選択する C の Toledo[42]のモデルをさらに拡張したものであり、HMM を応用した、時間的に連続したマルコフ過程に従った状態の推移を表現するモデルとなっている。本モデルもこの状態の推移という概念を取り入れている。また、本モデルは運転意図という潜在状態を用いることによって、第 2.5 節で示した、複数の加減速状態・車線変更段階に対応した加速度を表現した E の Toledo ら[62]のモデルの構造も包含している。さらに、状況別の複数の加減速状態を潜在クラスとして表現した Koutsopoulos ら[32]のモデル F の構造も包含している。加えて、本モデルは車線変更に関する潜在状態の変化に対しても LCM の構造を応用しており、E の Toledo ら[62]のモデルよりも柔軟に車線変更に対する意思決定について分析することを可能にした。

表 3.1 代表的な既存モデルと本統合モデルとの比較

モデル \ 構造		加速度 a_t	状態の生起確率 $P(l_t)$	状態 l_t の種類
A. 追従モデル		$a(x_t) + \varepsilon$		
B. Gap Acceptance モデル			$P(l_t x_t)$	変更中か否か
車線変更 モデル	C. 段階的選択		$P(l_t k_t, x_t)P(k_t x_t)$	変更希望先
	D. HMM 応用		$P^\Delta(l_t \leftarrow l_{t-1} x_t)P(l_{t-1})$	変更予定車間 開始後か否か
E. 車線変更・加速度の統合		$a^{l_t}(x_t) + \varepsilon$	$P(l_t k_t, x_t)P(k_t x_t)$	の組み合わせ
F. 状況別 加速度の統合		$a^{l_t}(x_t) + \varepsilon$	$P(l_t x_t)$	加速・減速等
G. 運転意図推移統合型 車両挙動モデル		$a^{l_t}(x_t) + \varepsilon$	$P^\Delta(l_t \leftarrow l_{t-1} x_t)P(l_{t-1})$	加速・減速等 ・車線変更関連

※ C. 段階的選択の車線変更モデルは Toledo 2003[42]等。

※ D. HMM 応用の車線変更モデルは Choudhury 2007[44]等。

※ E. 車線変更・加速度の統合は Toledo ら 2003[62]等

※ F. 状況別 加速度の統合は Koutsopoulos ら 2012[32]

x_t : 時刻 t における説明変数

ε : 加速度誤差

l_t, k_t : とともに潜在状態, または, 顕在状態

$P(l_t | x_t)$: 状態 l_t の選択確率

$P^\Delta(l_t \leftarrow l_{t-1} | x_t)$: 状態 l_{t-1} から l_t への推移確率

また、運転意図推移統合型車両挙動モデルでは、車線変更中の車両挙動を明示的に扱うという特徴も有しており、この点も含め、運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みに関する特徴をまとめると以下の7点になる。

- 1) 速度調整行動と車線変更に関する選択行動を関連付ける。
- 2) 複数の潜在状態によって車線変更に関する意思決定を表現する。
- 3) 複数の潜在状態によって単路部における複数の走行状態を表現する。
- 4) 潜在状態の推移を扱う。
- 5) 車線変更中の車両挙動を明示的に扱う。
- 6) モデルパラメータ推定における尤度関数の収束が比較的容易。
- 7) モデルパラメータ推定によって、どのような潜在状態が存在するのかを分析できる。

上記7点の全ての特徴を、運転意図の推移という統一的な構造によって表現した点に運転意図推移統合型車両挙動モデルの新規性がある。特にモデル構造上の大きな特徴である1)~3)の特徴について、運転意図推移統合型車両挙動モデルと構造が類似している、E.の Toledo ら[62]のモデルは3)7)の特徴、F.の Koutsopoulos ら[32]のモデルは1)2)の特徴を持っておらず、双方の特徴を有したモデルは、運転意図推移統合型車両挙動モデルのみであるといえる。

3.10. まとめ

本章では、運転意図の定義から、その特徴を考察し、運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデルを導出した。加えて、当該モデルで扱う運転意図の推移構造について述べたうえで、モデルの定式化を行った。

また、既存モデルとの比較によって、本モデルは既存のモデルを踏襲し、運転意図の推移という統一的な枠組みによって、車線変更に伴うドライバーの意思決定や、自由走行と追従走行の切り替えなどを含む、一連の車両挙動を表現できる点に特徴があることを述べた。

加えて、運転意図推移統合型車両挙動モデルに関するモデルパラメータ推定は、車両挙動を表現するためのパラメータ推定としての側面だけでなく、潜在クラスとしてのドライバーの運転意図を推定する手法としての側面も併せ持つ。車両軌跡から最尤推定によって得られたパラメータを用いて、確率的に推定される運転意図は「推定運転意図」と呼んでいる。このように、運転意図がモデルを用いて推定される可能性がある理由は、モデルの中心的な構造が、運転意図の推移と運転意図に対応した加減速挙動という単純な構造として構築されているためであり、この統一的な構造が運転意図推移統合型車両挙動モデルの枠組みの最も優れた点である。ただし、推定運転意図が実際のドライバーが持つ意図と合

致してるか否かは定かではない．そのため，本研究では，推定運転意図とは別に，運転意図についての質問に対して直接ドライバーから得た回答を元に生成した「表明運転意図」を扱う．この２種類の運転意図の特徴を表 3.2 にまとめる．

表 3.2 ２種類の運転意図

運転意図	推定運転意図	表明運転意図
導出元データ	ビデオ画像からの車両軌跡	走行後のインタビュー
導出方法	モデルパラメータ推定に伴う 内生変数の推定	インタビュー結果の クラスタリング
データの特性	客観的	主観的
特性	確率的	確定的
	サンプル全体の平均的な意図	個別の意図

特にこの２種類の運転意図の特性は対照的である．客観的な車両軌跡データから確率的に推定される推定運転意図に対して，表明運転意図はドライバーの主観に基づいた確定的なインタビュー回答内容が元になっている．この２種類の運転意図の現れ方に同一の特徴がみられれば，推定運転意図が実際のドライバーの運転意図に合致している可能性が高くなる．ただし，推定運転意図は，車両軌跡データを複数種類の車両挙動へと確率的に分類したものとみなすこともできるため，ドライバーの運転行動に表れない意図を推定することは不可能である点において，表明運転意図よりも情報量は少なくなると考えられる．しかしながら，運転行動，及び車両挙動に表れるドライバーの運転意図を読み取れる可能性は，学術的に重要な側面であると言える．

本論文の第 5 章，第 6 章では表明運転意図を取得し，その特徴をつかむことによって，推定運転意図との比較を行う．続く，第 4 章では，詳細な車両軌跡データを用いてモデルのパラメータを実際に推定し，さらにモデルの特徴についての理解を深める．

参考文献

[67] Donald Davidson, G. E. M. Anscombe, Michael • E. Bratman, '自由と行為の哲学 (現代哲学への招待 Anthology) 第2部 行為', 2010.

[68] Michael • E. Bratman, 'Intention, plans, and practical reason', 1999.

(以下再掲)

[19] Ozaki, H., 'Assistance of Drivers to Mitigate Highway Capacity Problem', Proc. of 2nd WC on ITS, pp.1727-1731, 1995.

[42] Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., 'Modeling integrated lane-changing behavior. ', Transpn. Res. Board., Vol.1857, pp.30-38, 2003.

[44] Choudhury, C., 'Thesis. Modeling Driving Decisions with Latent Plans', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 2007.

[62] Toledo, T., 'Thesis. Integrated driving behavior modeling.', Department of Civil and Environmental Engineering, MIT., 2003.

[32] Koutsopoulos, Haris N, Farah, Haneen, 'Latent class model for car following behavior', Transportation research part B: methodological, Vol.46, No.5, pp.563-578, 2012.

4. 運転意図推移統合型車両挙動モデルのパラメータ推定

4.1. はじめに

本章では前章において定義した運転意図推移統合型車両挙動モデルのモデルパラメータ推定を、ビデオ画像より取得した詳細な画像軌跡データを用いて行う。本運転意図推移統合型車両挙動モデルはパラメータ推定における収束しやすさを考慮した構造を持ち、特徴的な計算手順を用いて収束計算を行っているため、次節ではその計算手順について概説する。そのうえで、実際に推定に用いたデータの概要と推定結果について述べ、本モデルの特徴について言及する。

4.2. 運転意図推移統合型車両挙動モデルパラメータ推定手法

本稿で構築するモデルに付随するパラメータ β は、第3章で述べたように、大きく3つのパラメータ——運転意図推移選択モデルの効用関数パラメータ γ ，加速度モデルパラメータ η ，遅れ時間パラメータ τ ——に分類することができる。本研究における推定では、遅れ時間パラメータ τ は加速度モデルに関する説明変数に対してのみ考慮し、遅れ時間が想定外の値とならないよう、 τ に0～5秒の範囲制限を設けている。

パラメータ推定は第3章で定義した以下の走行別の尤度関数の和を最大化することによって行う。

再掲：

$$L(\boldsymbol{\beta}, X) := L^{\text{trans}}(\boldsymbol{\gamma}, r_{1:T}^*, S_{1:T}, \mathbf{x}_{1:T}(\boldsymbol{\tau})) + L^{\text{acc}}(\boldsymbol{\beta}, X) \quad (3.28)$$

$$L^{\text{trans}}(\boldsymbol{\beta}, X) = \ln \left(\prod_{t=2}^T \sum_{l_t \in A} \delta^{A^{-1}(l_t), r_t^*} \sum_{l_{t-1} \in A} \left(P^\Delta(l_t | l_{t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) \right. \right. \\ \left. \left. \times P(l_{t-1} | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\boldsymbol{\tau})) \right) \right) \quad (3.44)$$

$$L^{\text{acc}}(\boldsymbol{\beta}, X) \\ = -\frac{1}{2\sigma^{\text{acc}2}} \sum_{t=1}^T \sum_{l_t \in A} P(l_t | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\boldsymbol{\tau})) \left(a_t^* - a^{l_t}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) \right)^2 \quad (3.45)$$

$$P(l_t | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:t}^*, S_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t}(\boldsymbol{\tau})) \\ = \frac{\delta^{A^{-1}(l_t), r_t^*} \sum_{l_{t-1} \in A} P^\Delta(l_t | l_{t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) P(l_{t-1} | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\boldsymbol{\tau}))}{\sum_{k_t \in A} \delta^{A^{-1}(k_t), r_t^*} \sum_{k_{t-1} \in A} P^\Delta(k_t | k_{t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_t, \mathbf{x}_t(\boldsymbol{\tau})) P(k_{t-1} | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:t-1}^*, S_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1}(\boldsymbol{\tau}))} \quad (3.42)$$

$$P(l_1 | \boldsymbol{\gamma}, r_{1:1}^*, S_{1:1}, \mathbf{x}_{1:1}(\boldsymbol{\tau})) = \delta^{A^{-1}(l_1), r_1^*} / \sum_{k_1 \in A} \delta^{A^{-1}(k_1), r_1^*} \quad (3.43)$$

$$\max_{\boldsymbol{\beta}} L(\boldsymbol{\beta}, X^{\text{all}}) \\ \equiv \max_{\boldsymbol{\beta}} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=2}^T \sum_{l_{m,t} \in A} \ln \left(\delta^{A^{-1}(l_{m,t}), r_{m,t}^*} \sum_{l_{m,t-1} \in A} \left(P^\Delta(l_{m,t} | l_{m,t-1}, \boldsymbol{\gamma}, S_{m,t}, \mathbf{x}_{m,t}(\boldsymbol{\tau})) \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times P(l_{m,t-1} | \boldsymbol{\gamma}, r_{m,1:t-1}^*, S_{m,1:t-1}, \mathbf{x}_{m,1:t-1}(\boldsymbol{\tau})) \right) \right) \right) \\ - \frac{1}{2\sigma^{\text{acc}2}} \min_{\boldsymbol{\eta}} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{l_{m,t} \in A} P(l_{m,t} | \boldsymbol{\gamma}, r_{m,1:t}^*, S_{m,1:t}, \mathbf{x}_{m,1:t}(\boldsymbol{\tau})) \left(a_{m,t}^* - a^{l_{m,t}}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}_{m,t}(\boldsymbol{\tau})) \right)^2 \right) \quad (3.46)$$

上記の尤度関数は厳密には凸関数ではないため、ヒューリスティックを交えた手法を用いて尤度関数の極所最大値を探索することでパラメータ推定を行う。本章では図 4.1 に示す焼きなまし法 (SA) と滑降シンプレックス法を組み合わせたパラメータ推定計算手法を考案する。

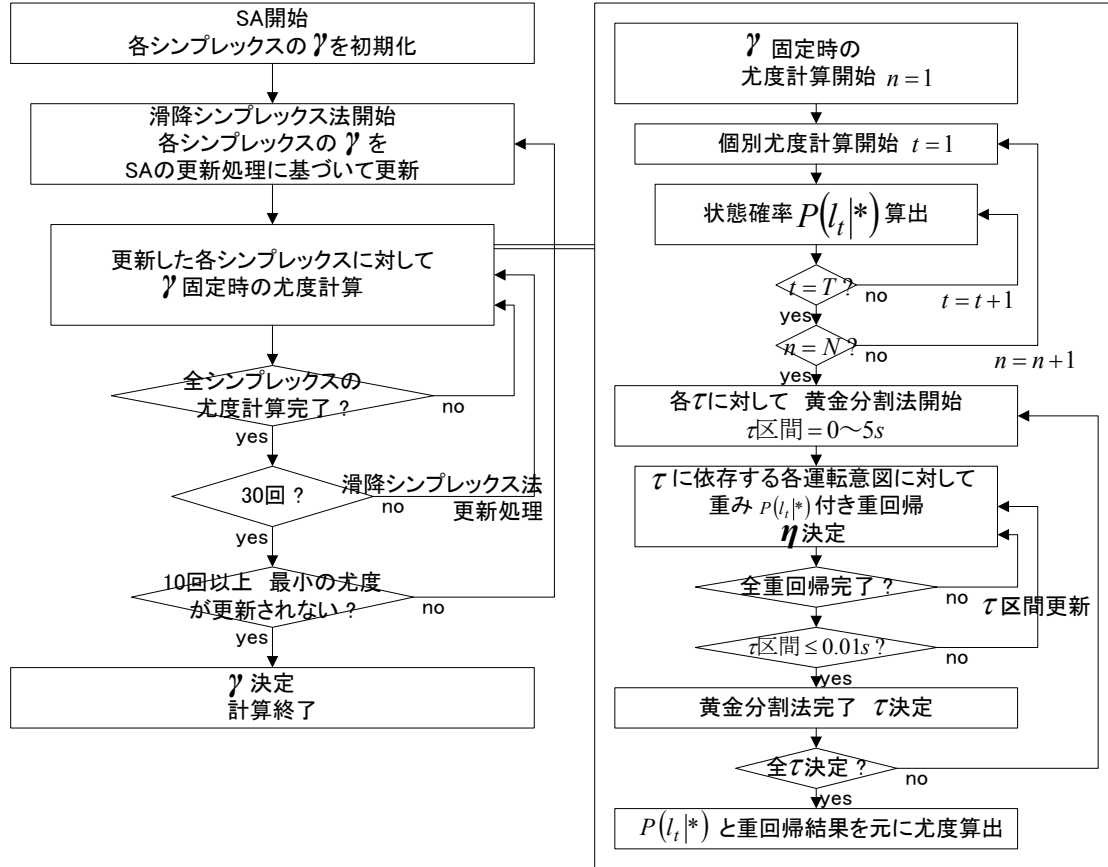


図 4.1 パラメータ推定計算の流れ（全パラメータ $\beta := \{\gamma, \eta, \tau\}$ を決定する）

加速度算出式(3.41)における線形パラメータ η は他のパラメータが一定であれば重回帰分析が可能であり，パラメータを容易に収束させることができる．また，加速度モデルの説明変数に対する遅れ時間 τ を 0～5 秒の範囲制限付きとしており，且つ，推定に用いるデータが一般的なものであれば，遅れ時間に対する重み付き加速度残差二乗和はほぼ凸関数になると考えられるため，黄金分割法によって遅れ時間を表現するパラメータ τ も容易に収束させることができる．これらの計算は運転意図推移選択モデルの効用関数パラメータ γ が固定されている場合に可能であり，その計算手順を図 4.1 の右側に示している．なお，遅れ時間 τ を伴う各説明変数値は線形補間によって時間的に連続したものとして扱う．

上述した計算手順を用いれば，ヒューリスティックを交えた手法を用いて直接，極所最大値を探索する推定を行わなければならないパラメータは，運転意図推移選択モデルの効用関数パラメータ γ のみとなる．

滑降シンプレックス法は初期のシンプレックス（頂点）群に推定結果が大きく依存するという特徴を持つ．故に，推定結果の初期のシンプレックス群への依存度を下げ，パラメータの探索範囲を拡張するために，図 4.1 の左側の計算手順に従い，初期のシンプレックス群のパラメータを SA を応用したヒューリスティックを用いて値を分散させている．滑降シンプレックス法による収束は 30 回行っており，SA における更新で初期値を変化させ

ても 10 回以上尤度が更新されなければ, 十分収束したと判断して計算を終了すればよいと考えた.

4.3. 推定用車両軌跡データ

4.3.1. 車両軌跡データの概要

本節ではパラメータ推定に用いる車両軌跡データについて説明する.

パラメータ推定には阪神高速道路 1 号環状線と 12 号守口線が合流する区間とその上流において, 2005 年 8 月 30 日 8:49:00~9:04:00 の 15 分間に連続する 11 台のビデオカメラで撮影された画像から抽出した車両走行軌跡データ[69]を用いる. 当該データは 0.2 秒間隔で車両の位置を目視で記録したものであり, 提案しているモデル構造を推定するために十分な時空間解像度を有しているといえる. また, 観測した 15 分間には, 渋滞流と自由流が混在した交通流を含んでおり, 渋滞や事故の要因となる車両相互のコンフリクトが含まれていると考えられる. 図 4.2 は図 4.3 に示した車両検知器設置位置の車両軌跡データ取得日における交通量を示している. 図 4.2 より, 車両軌跡データ取得時間帯において平均速度が低下し始めていることが分かり, 渋滞流が当該時間帯に混在して入りことが示唆される. 図 4.3 は車両軌跡データ取得区間の概要と観測地点の位置関係を示している. 当該区間は, 環状線 3 車線, 守口線 2 車線が合流し 4 車線の道路となる線形を含んでおり, 車線移動を強いられるため, ドライバーへの負担が大きい区間である.

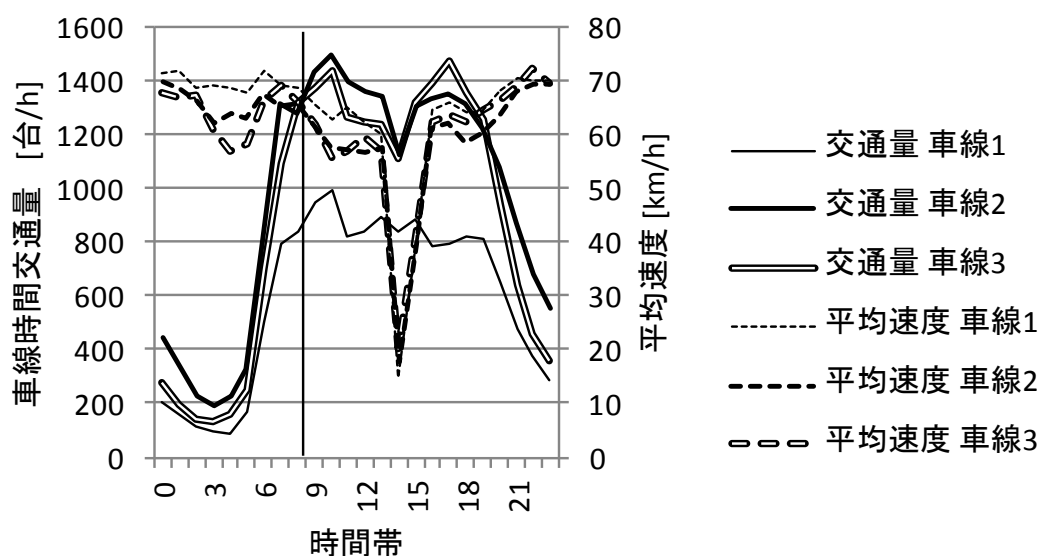


図 4.2 車両軌跡データ取得日の交通量

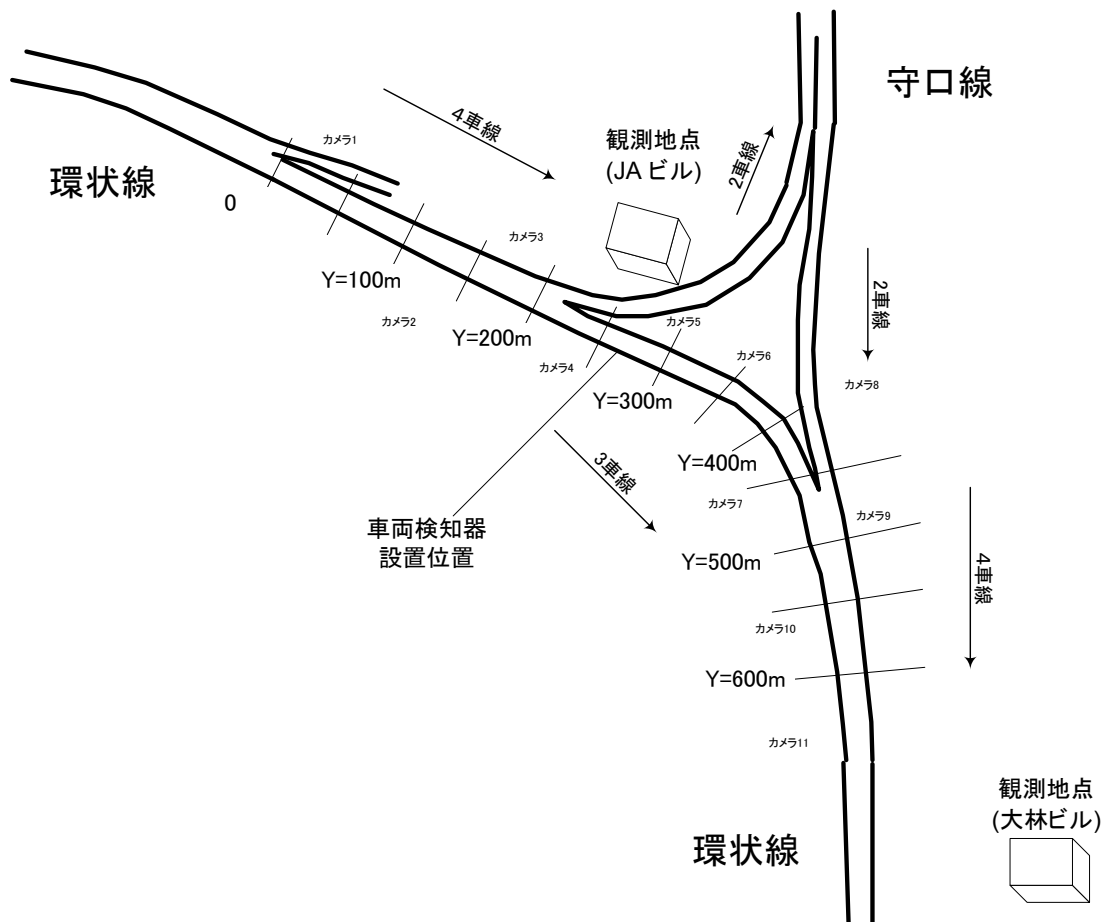


図 4.3 車両軌跡取得区間

4.3.2. 車両位置・走行状態・周辺車両の定義

車両軌跡データは図 4.3 に示すように道路の進行方向に沿って定義された Y 軸と，進行方向と垂直に定義された X 軸の座標に基づいて位置を定義している．また，各位置座標がどの車線上のものかを付加的に定義している．図 4.4 は，この座標定義を用いた走行状態の定義について示している．



図 4.4 走行状態の定義

第3章で述べたように、本モデルは「通常走行状態」と「推移走行状態」の2種類の走行状態を扱う。図4.4に示すように、推移走行状態は車線変更の前後において、座標の車線変更方向への変化が0より大きい期間として定義し、それ以外を通常走行状態として定義している。この時、自車両が異なる車線に1秒以上滞在しない場合は、そもそも車線変更がなかったものとして扱っている。また、合流に対する推移走行状態については合流部の座標から、推移走行状態と通常走行状態を区別するように定義した。以上の定義に従って区別された推移走行状態と車線別の通常走行状態を図4.5に示す。図4.5はビデオ撮影を行った15分間で観測された全車両軌跡の時々刻々の座標をX-Y軸上にとり、走行状態別に色分けしたものである。図中の黒い点は上述した定義に基づいて推移走行状態と判断された時点における車両の軌跡を示している。

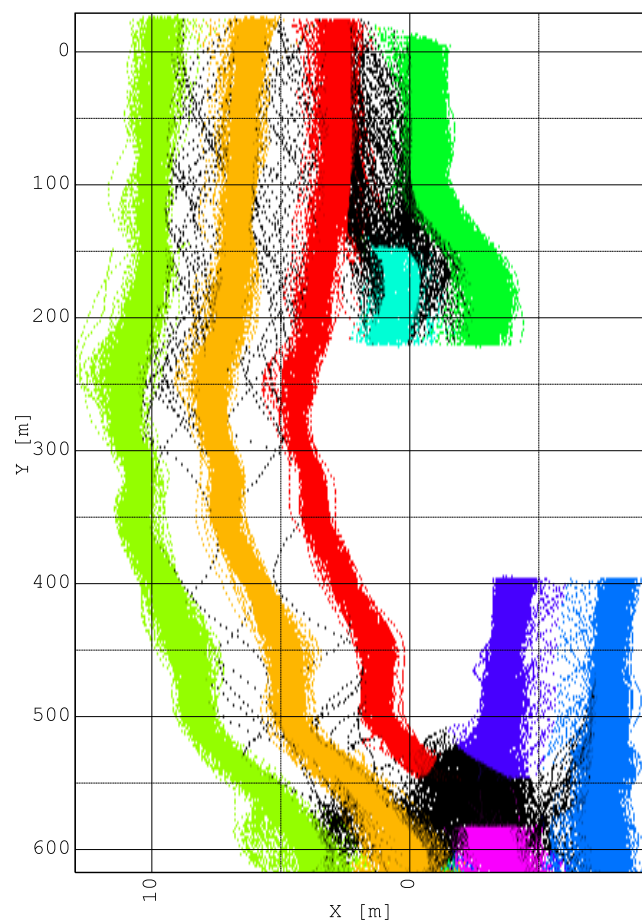


図 4.5 全ての観測された車両軌跡 ※黒色は推移走行領域

一方、相対距離等を算出する対象となる周辺の車両は図 4.6、図 4.7 のように定義する。定義の際、パラメータ推定対象の自車両の走行状態と存在する車線、及び、周辺車両の走行状態と存在する車線、加えて、周辺車両の自車両から見た道路に沿った方向の 3 要素の組み合わせをもとに周辺車両を自車両への影響が異なると考えられる 6 種類の場合分けしている。その場合分けの境界を図 4.6、図 4.7 では点線で表現している。6 種類に場合分けされた各車両群の中で最も自車両に近いものを相対距離等を算出する対象と定義している。

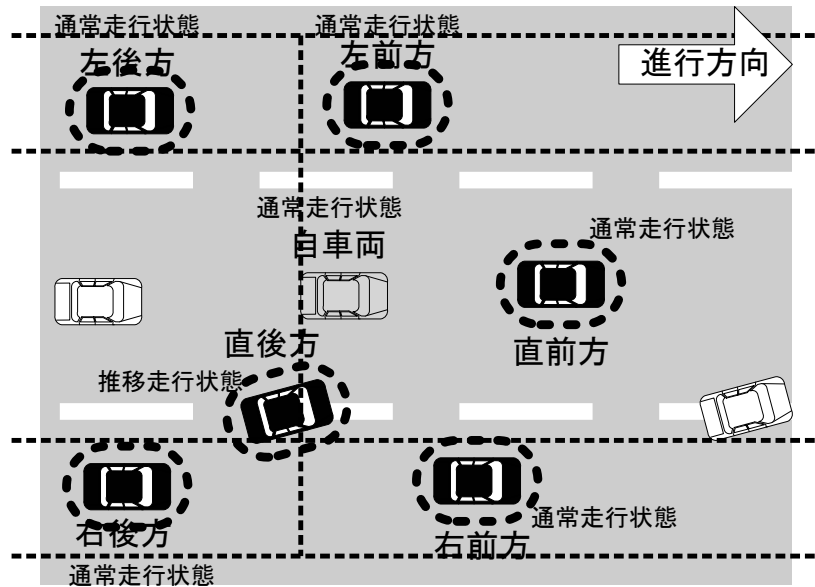


図 4.6 周辺車両定義（自車両が通常走行状態）

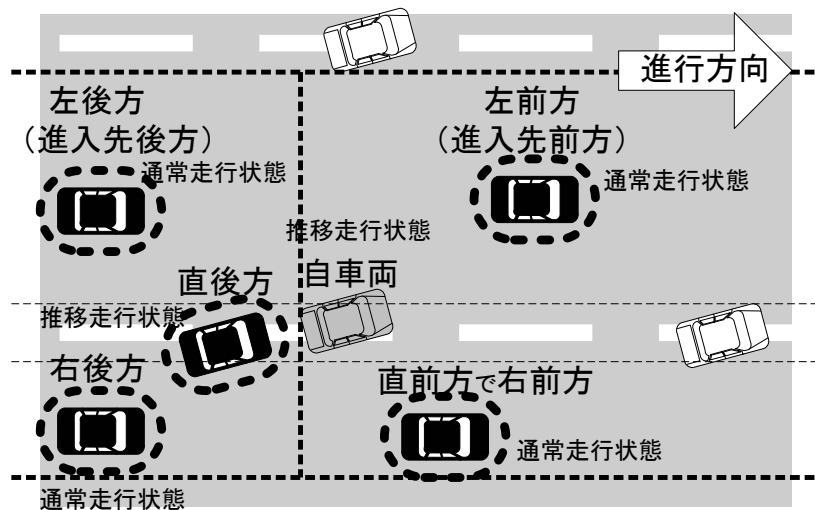


図 4.7 周辺車両定義（自車両が推移走行状態）

例えば，最も追従対象とみなされる可能性の高い直前方車両は，自車両が通常走行状態である場合，自車両と同じ車線上において通常走行状態にある車両，または，左右に隣接した車線に関する推移走行状態にある車両であり，自車両よりも下流の，最も上流に存在する車両として定義した．

4.3.3. 推定用車両軌跡の抽出

この車両軌跡のうち，パラメータ推定に利用するデータは十分な距離走行した軌跡が望ましい．また，下流側では前方のデータが存在せず前方の車両が定義できない部分も存在する．そこで，図 4.5 に示したすべての車両軌跡のうち，パラメータ推定計算に適した部

分を取り出し、推定を行うデータセットを作成している。

本論文では、2 種類の運転意図推移構造の運転意図推移統合型車両挙動モデルに対してモデルパラメータ推定を行う。その一つは追従走行のみを扱った構造であり、もう一つは、車線変更・合流を考慮した構造である。以降はそれぞれの運転意図推移構造と、それぞれに対応したデータセットの抽出条件について述べる。

4.3.3.a. 追従走行のみを扱った運転意図推移構造

追従走行のみを扱った運転意図推移構造では、第 3.7.1 項で示した運転意図推移構造に準じた構造である。図 4.8 にこの追従走行のみを扱った運転意図推移構造を示す。この運転意図推移構造では、車線変更を考慮せず、2 種類の運転意図を内生変数に持つ単純な構造を扱うことによって、運転意図推移統合型車両挙動モデルの複数の内生状態を扱うという構造が備える特徴を推定結果より明らかにする。なお、2 種類の運転意図の名前は、第 4.4 節で示す推定結果を元に命名しており、車線変更を考慮しないため、通常走行状態の運転意図のみ扱っている。

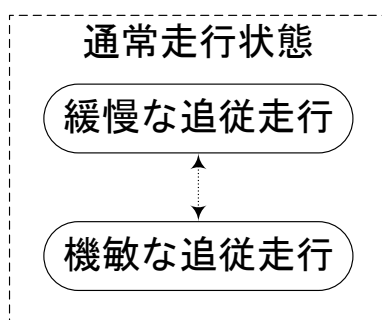


図 4.8 追従走行のみを扱った運転意図推移構造
(推定結果を元に推定運転意図を命名)

追従走行のみを扱った運転意図推移構造に対しては、同一車線を 27 秒以上、直前方車両が観測区域内に存在する状態で走行し続けた車両を抽出し、はじめの 2 秒間、最後の 5 秒間を除外した走行軌跡をパラメータ推定用のデータとして用いている。対象車両が車線変更するときの影響を除外して単純な追従における運転意図推移統合型車両挙動モデルの有意性を分析するために、このような操作を行った。結果的に、141 車両、17714 プロットが抽出された。

4.3.3.b. 車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造

車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造は、第 3.7.2 項で示した運転意図推移構造に準じた、図 4.9 に示す 6 つの運転意図間の推移を扱う構造である。なお、煩雑化を抑えるため、ここでは、ギャップ選択を 2 つの運転意図で表現することとした。また、追従走

行のみを扱った運転意図推移構造同様、運転意図の名前は、第 4.4 節で示す推定結果を元に命名している。

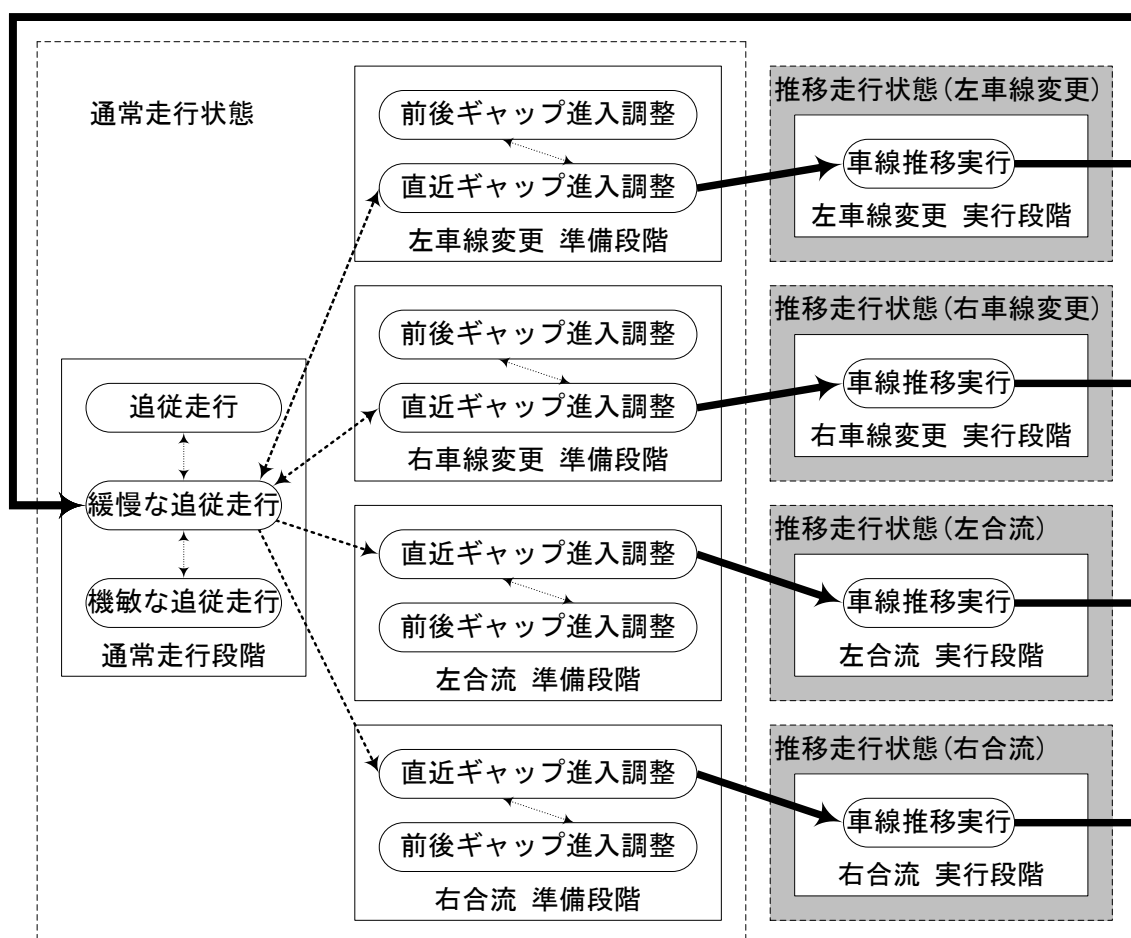


図 4.9 車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造
(推定結果を元に推定運転意図を命名)

車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造に対しては、走行領域が推移した直後から必要な変数がすべて定義可能であり、5 秒以上連続した車両軌跡のみを推定に用いるデータセットとした。ただし、車両軌跡の開始時点は走行状態が推移した直後の運転意図が一意に定まる時点とした。上記の条件で抽出された車両軌跡を図 4.10 に示す。当該車両軌跡は 205 車両、14064 プロットで構成される。

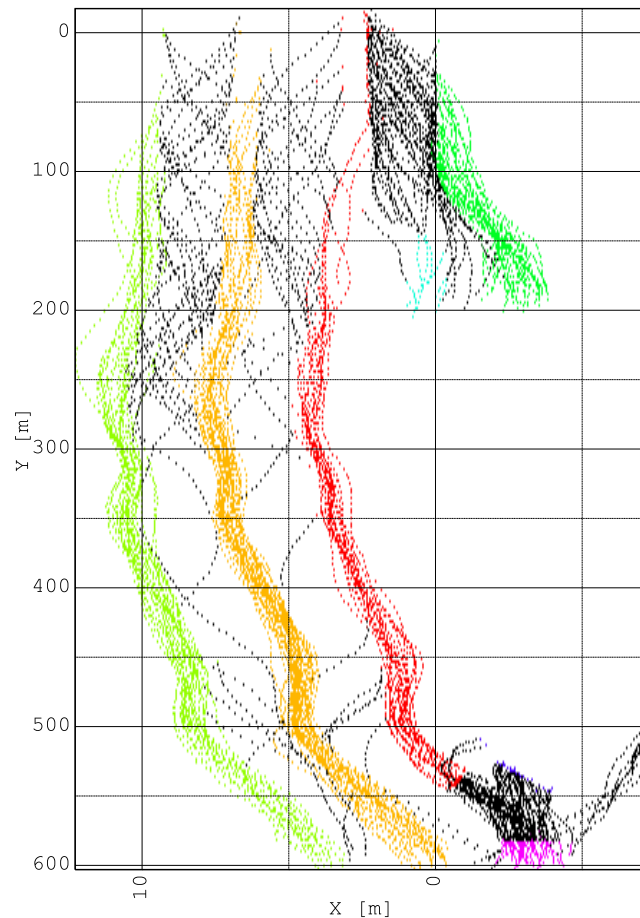


図 4.10 推定に用いる車両軌跡
※車線別に色分け・黒色は推移走行領域

4.3.4. 推定時間

上述のデータを用いて推定を行った結果、いずれの運転意図推移構造・データセットに対しても、黄金分割法による全ての遅れ時間の算出に数秒、全てのパラメータを求める収束計算には数十時間を要した。推定手法にヒューリスティックを導入しているため、収束に必要な時間は乱数に依存しており、推定に要する時間を見積もることは難しい。しかし、滑降シンプレックス法による計算時間は、データセットの大きさに依存するため、他のデータセットを用いて推定する場合には、上記の推定時間がおおよその目安となるであろう。

4.4. 推定結果

4.4.1. 比較対象の単純モデル

本研究では、推定運転意図としての内生変数の有無で推定結果がどの程度異なるかを示すために、運転意図推移統合型車両挙動モデルの比較対象として、推定運転意図の区別のないモデルの推定も併せて行っている。当該モデルを以降では「単純モデル」と称する。

単純モデルは運転意図推移統合型車両挙動モデルと同一の車両軌跡のうち通常走行状態の部分のみを用いてパラメータ推定を行う。また、単純モデルは単一の加速度推定式で構成されるため、重みなしの重回帰と黄金分割法による遅れ時間の推定のみを行うことで、全パラメータが推定できる。

4.4.2. 追従走行のみを扱った運転意図推移構造

4.4.2.a. パラメータ推定結果

追従走行のみを扱った運転意図推移構造は2つの推定運転意図のみを切り替える構造を持っており、運転意図推移統合型車両挙動モデルの中では構造が最も単純なモデルといえる。そのため、本項では、追従走行のみを扱った運転意図推移構造の推定結果より、より複雑な運転意図推移統合型車両挙動モデルが備えるであろう特徴について、特に再現性の観点より示唆を与える。

モデルの推定結果を表4.1～表4.3に示す。表4.1は各推定運転意図の重回帰の適合度と重み、反応遅れ時間を示している。設定した2つの運転意図は構造上まったく同一であるが、後述のモデルの推定結果に適合するように「緩慢な追従走行」と「機敏な追従走行」と命名している。

表 4.1 推定運転意図別加速度算出重回帰モデル推定結果

推定運転意図 名	R ² Adj	重み合計	遅れ時間 [s]
緩慢な追従走行	0.215	5212.0	2.4
機敏な追従走行	0.415	12502.0	1.1
合計	0.357	17714	
単純モデル	0.296	17714	1.3

遅れ時間は緩慢な追従走行において2.4秒となっている一方、機敏な追従走行は1.1秒と推定された。この結果から、機敏な追従走行の方が前方車両との位置関係の変化への反応が早いことがわかる。さらに機敏な追従走行の重回帰適合度は単純モデルよりも高くなっており、緩慢な追従走行では適合度は高くならなかった。この理由は設定した回帰モデルに、機敏な追従走行に対応する車両挙動はよく合致し、緩慢な追従走行に対応する車両挙動は合致しなかったためであると考えられる。このことは、異なる挙動が混在した一連の車両挙動の中の、表4.2に挙げる線形パラメータを持つ設定した追従モデルによく合致する挙動とそれ以外とが、2つの潜在状態へと適切に切り分けられたことを示唆している。設定した追従モデルは前方車両に対して加速度を調整する一般的な追従モデルに準じた構造であるため、前方車両に機敏に反応する車両挙動の方がよく合致する結果となったといえる。また、緩慢な追従走行の重みの合計は、機敏な追従走行の重みの合計よりも小さい。

これは、設定した追従モデルに合致しない走行が、一連の車両挙動の中の一部だけであったことを示唆する結果である。よって、この緩慢な追従走行を切り分けて、別個のモデルとすることで、この運転意図推移統合型車両挙動モデルは全体の適合度を向上させているといえる。

表 4.2 推定運転意図別 加速度モデル推定パラメータ

説明変数	緩慢な追従走行		機敏な追従走行	
	パラメータ	P値	パラメータ	P値
定数	1.7E-03	0.0E+00 ***	-6.6E-01	0.0E+00 ***
対象車両速度	1.1E-02	3.1E-05 ***	2.3E-02	1.4E-16 ***
直前方車両相対速度	9.2E-02	0.0E+00 ***	2.1E-01	3.5E-17 ***
直前方車両相対距離	1.7E-03	0.0E+00 ***	3.5E-03	3.6E-16 ***

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

表 4.2 は推定された重回帰パラメータを示している。対象車両速度と前方車両相対距離は常に正、前方車両相対速度は接近するときに負の値をとる変数であり、単位は[m], [m/s]で計算している。まず、すべての変数が有意な値を示していることが確認できる。加えて遅れ時間の考察と同様に、機敏な追従走行では前方車両との相対値に対応するパラメータが大きくなっており、前方車両に敏感な走行が抽出されていることがわかる。

表 4.3 には各推定運転意図に推移する確率を算出する LOGIT モデルの効用関数のパラメータを載せている。重回帰同様すべての変数が有意な値として推定されていることが確認できる。また、パラメータの符号を見ると前方車両との相対距離が小さくなったときに機敏な追従走行へ推移する効用が高くなり、逆に相対距離が大きくなると追従走行へ推移する効用が高まることがわかる。

表 4.3 運転意図推移効用関数推定パラメータ

推移元→推移先:説明変数	
機敏な追従走行→緩慢な追従走行:	
定数	-4.5E+05 ***
直前方車両相対距離	7.8E+03 ***
緩慢な追従走行→機敏な追従走行:	
定数	2.9E+06 ***
直前方車両相対距離	-5.1E+04 ***

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

実際にどのような状況が各推定運転意図として抽出されているかを確認するために、各推定運転意図における各変数の重み付平均値を算出したものを表 4.4 に示す。前方車両と

の相対距離を比較すると、機敏な追従走行のほうがかなり小さな値を示していることがわかる。一方、緩慢な追従走行では 100m 以上と長く幾分自由走行のような挙動も含まれていることが考えられる。また、速度と加速度もともに機敏な追従走行のほうが小さく、前方車両に対応して減速している挙動が機敏な追従走行として切り分けられた状況に多く含まれていることが示唆される。

表 4.4 各推定運転意図における基本的変数の平均値

推定運転意図名	加速度 [m/s ²]	速度 [m/s]	車間距離 [m]
緩慢な追従走行	-0.2±0.6	19.5±3.0	101.7±47.1
機敏な追従走行	-0.3±0.6	18.1±3.2	31.4±12.3
合計	-0.2±0.6	18.5±3.2	52.1±42.3

4.4.2.b. 運転意図推移に関する考察

さらに、緩慢な追従走行と機敏な追従走行とが切り替わる状況を考察するために、表 4.3 で示した 2 つのバイナリ LOGIT モデルの推定結果について、直前方車両との相対距離と計算される確率との関係を、図示したものが図 4.11 である。

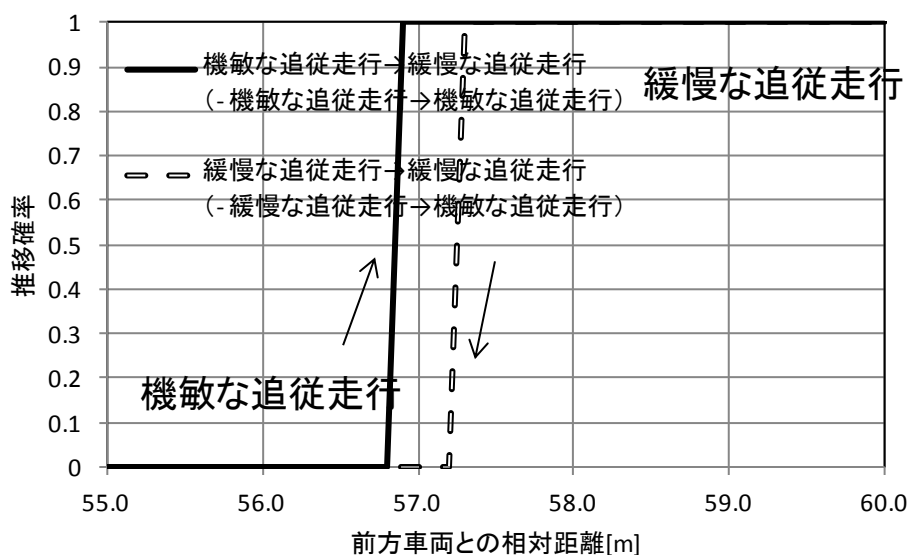


図 4.11 運転意図推移確率

今回の推定結果では、緩慢な追従走行から機敏な追従走行に推移する場合と、機敏な追従走行から緩慢な追従走行に推移する場合との間に大きな違いが見られなかった。緩慢な追従走行から機敏な追従走行に推移する場合の前方車両との相対距離が僅かに大きいものの、およそどちらの方向の推移も前方車両との相対距離が約 57m を境に生じることがわか

る．このことは、緩慢な追従走行と機敏な追従走行とを選択する構造に時間的な連続性が見られなかったことを示唆する．ここで推定した運転意図推移構造は単純であったためにこのような結果となったといえる．しかし、構造が複雑になれば、推移を考慮することによってのみ再現できる時間的な幅を持った現象が存在する可能性もある．

推定運転意図の推移と車両挙動の変化を確認するため、図 4.12、図 4.13 に相対距離・推定運転意図状態確率・加速度の値の時間経過推移について、相対距離の変動が顕著であった 2 車両の例を示す．最も上段の図は、単純モデルによって推定された加速度と、観測された加速度に加えて、各推定運転意図の推定加速度をそれぞれの推定運転意図選択状態確率で重み付けした加速度値、すなわちモデルによる推定加速度の期待値の推移を表現している．

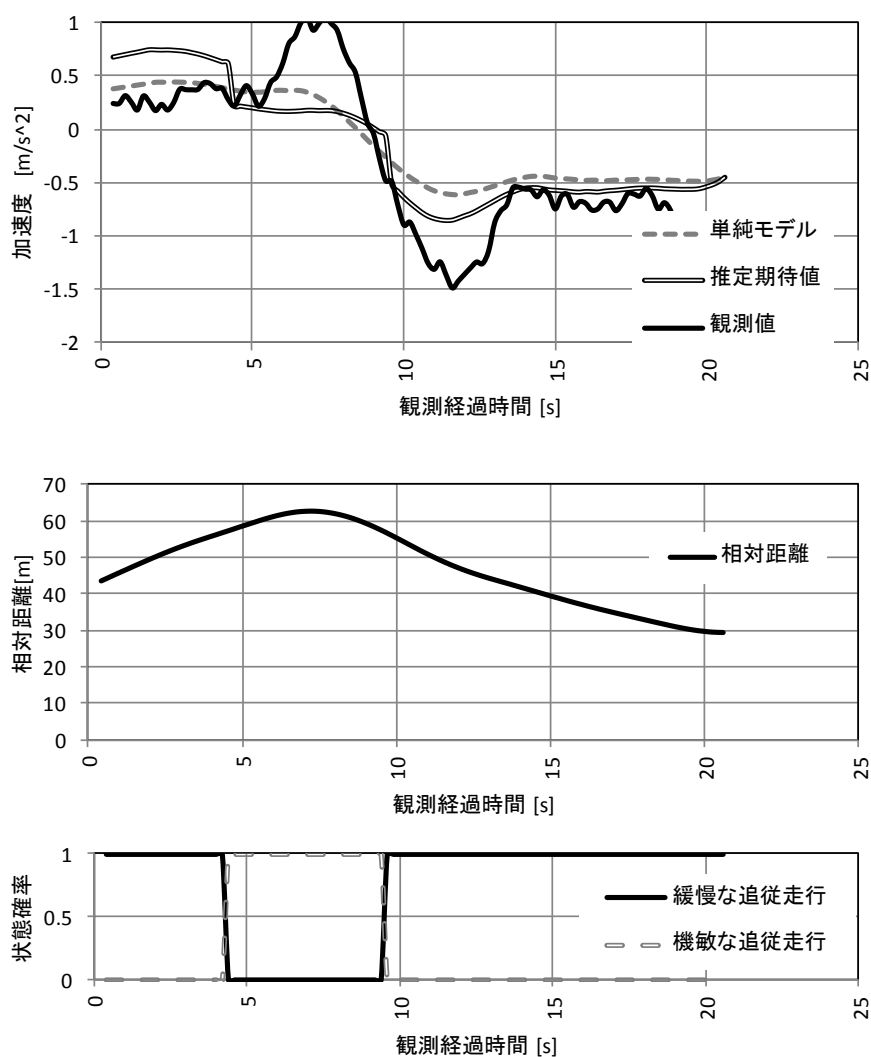


図 4.12 相対距離・推定運転意図状態確率・加速度の推移（推定例 A）

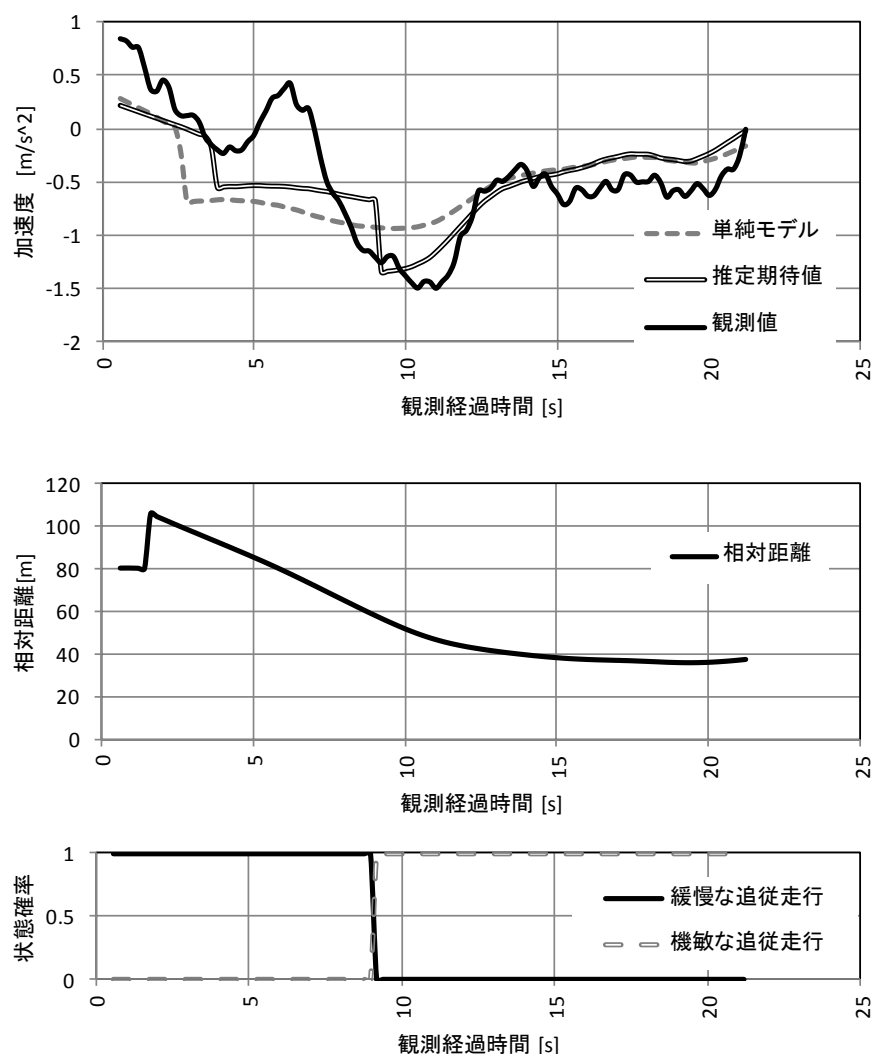


図 4.13 相対距離・推定運転意図状態確率・加速度の推移（推定例 B）

相対距離の変化と推定運転意図状態確率の推移を合わせて見ると、相対距離が 57m 程度の値で追従走行と機敏な追従走行の選択状態確率が逆転していることが読み取れる。また、単純モデルの推定値は運転意図推移統合型車両挙動モデルの推定期待値と比較して絶対値が小さい傾向にあることがわかる。これは、状況を切り分けずに推定した場合、同程度の説明変数の値を示す状況でも加速度が分散し、結果的にその平均値に近い値が算出されるようなパラメータ値として推定されてしまう為である。このような感度の悪いモデルでは、急減速や急加速等の交通コンフリクトを起こす原因となる挙動を表現することができないであろう。実際の車両の加速度観測値の絶対値は単純モデルの値の 2 倍以上の値となっている。

一方、2 つの推定運転意図に切り分けると各推定運転意図の推定加速度に差がある分、加速度がある程度観測値に従うように、推定運転意図選択状態確率が切り替わっていることが確認できる。特に、運転意図推移統合型車両挙動モデルでは、図 4.12 の例の 10.0 秒

以降の大きな減速を推定できている。これは複雑な状況下における交通コンフリクトの再現性を従来より高められる可能性を示唆している。

図 4.13 の例には相対距離の変動が顕著であり、かつ前方車両が車線変更する事象を含む車両の結果を付け加えておく。相対距離等が不連続な値を示しているのは、第 4.3.2 項で定義した相対距離の算出を行う対象の車両が、車線変更のため異なる車両へと変化したためである。この右側の図では前方車両が他の車線へ移行したため、対象車両が急加速し、その後急に減速するといった挙動が現れている。このときの急な減速も、推定運転意図の切り替わりによって適切に表現できていることがわかる。また、これら 2 車両以外に関しても前方車両との相対距離の変化が少ないものの概ね、結果は同じであった。

最後に、統合型モデルが単純モデルに対してどの程度交通コンフリクトを表現できたかを述べておく。表 4.5 に推定された加速度がどの程度の幅で変動したかを示す。緩慢な追従走行と機敏な追従走行の減速度の 5%ile 値は状態確率が 50%以上の場合の推定加速度の小さい方からの 5%ile 値であり、標準偏差は状態確率が 50%以上の場合の値である。減速度 5%ile 値の絶対値と加速度の標準偏差の両方について観測値が最も大きく、次いで機敏な追従走行のモデル、単純モデルが大きく、緩慢な追従走行のモデルが最も小さい。図 4.12, 図 4.13 からの考察と同様に、単純モデルは大きな加減速の表現に向いていないことがわかる。

表 4.5 モデルで推定した加速度のばらつき

	減速度5%ile値 [m/ss]	標準偏差 [m/ss]
緩慢な追従走行モデル	-0.59	0.26
機敏な追従走行モデル	-0.87	0.37
単純モデル	-0.72	0.32
観測値	-1.25	0.58

4.4.3. 車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造

4.4.3.a. 加速度推定結果

車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造は本研究で提案する車両挙動モデル構築の概念を踏襲したモデルであり、本項ではそのパラメータ推定結果をもとに当該モデルがどのような特徴を持つのかについての分析を行う。

まず、全体の尤度の推定結果を表 4.6 に示す。前パラメータ 0 の場合の無情報尤度は、運転意図推移に関する尤度と加速度誤差に関する尤度の割合はほぼ 1 対 1 であったが、推定後は、運転意図推移に関する尤度が大きく改善されており、関数形が運転意図推移と加速度誤差に関する尤度では大きく異なることがわかった。なお、この割合はモデル中唯一

の調整パラメータである加速度標準偏差によって、調整が可能であり、運転意図推移と加速度のどちらを優先させるかを推定時に決定できる。以後、加速度と運転意図推移それぞれに関する推定結果に分けて考察を行う。

表 4.6 尤度の推定結果

尤度比	0.44
尤度	4057.5
: 走行状態推移	967.5
: 加速度誤差	3090.0
無情報尤度	7899.8

推定運転意図別の加速度の重回帰結果を表 4.7 に示す。推定を行う前の段階では、どの推定運転意図にどのような状況が割り振られるか、すなわち、どのような状況のときにその推定運転意図の重みが大きくなるかについて、正確には判断できないため、各推定運転意図の名前は推定後、結果を考慮して命名したものである。なお、表中の重みは各時刻に各推定運転意図と判定される確率の和であり、その合計は元のデータセットのプロット数に等しい。また、比較対象となる単純モデルの重回帰結果についても表 4.8 に示す。

表 4.7 重み付き重回帰推定結果（平均値±標準偏差）

推定運転意図 名	R ² Adj	重み合計	遅れ時間[s]	加速度[m/s ²]	速度[m/s]	車間距離[m]
緩慢な追従走行	0.231	2968.0	3.1	-0.3±0.6	19.6±3.5	70.3±53.2
追従走行	0.440	5500.1	1.9	-0.2±0.6	16.9±2.8	23.5±12.7
機敏な追従走行	0.989	12.0	0.1	-0.4±1.1	13.2±3.3	5.6±6.0
直近ギャップ進入調整	0.440	690.4	3.2	-0.1±0.8	19.9±3.9	53.8±38.1
前後ギャップ進入調整	0.708	302.4	3.0	-0.3±0.5	19.8±2.8	31.1±24.4
車線変更実行	0.205	4591	5.0	0.1±0.6	16.2±5.3	21.8±17.0

表 4.8 単純モデル重回帰推定結果（平均値±標準偏差）

モデル名	R ² Adj	重み合計	遅れ時間[s]	加速度[m/s ²]	速度[m/s]	車間距離[m]
単純モデル	0.240	9473	2.5	-0.2±0.6	18.0±3.4	40.6±39.6

各推定運転意図の重回帰結果の適合度に注目すると、緩慢な追従走行と車線推移実行以外の重回帰の適合度が単純モデルよりも高いことがわかる。すべてのデータを扱った単純モデルよりも複数のモデルに分割したほうが、データ数に相当する重みが小さいことを考慮しても、大きく適合度が改善される場合が存在することから、追従モデルの複数の推定運転意図への分割が有用であるといえる。通常モデルと車線推移実行以外には重回帰では

表現しにくい挙動が割り当てられていると考えれば、当該部分を既存の研究結果も踏まえて改善していけば全体としてもより当てはまりのよいモデルとなることが予想される。

推定された遅れ時間はほぼすべて妥当な 1～3 秒に収束した。また、推定を行う際に重み付き加速度誤差二乗和が遅れ時間に関して凸関数であることを確認しており、推定方法も妥当であったことがわかる。ただし、車線推移実行の遅れ時間は上限の 5 秒（凸関数）となったため、車線推移実行中は従来の追従モデルが適用できない特殊な挙動であるといえる。

通常走行段階における推定運転意図図には緩慢な追従走行と追従走行、機敏な追従走行が含まれている。追従走行は遅れ時間が短く、前方車両との相対距離も短い状況が割り当てられていることから、追従走行は機敏に前方車両に追従しなければならない状況を表していると考えることができる。機敏な追従走行では、遅れ時間は追従走行よりは長いものの、前方車両との相対距離が 5m 前後とかなり短く、速度・加速度も小さいので、危険な状況下で減速する挙動が抽出されていると考えられる。

図 4.14～図 4.16 に示すように、推定運転意図図別の加速度誤差は特に絶対値が大きい場合において単純モデルよりも減少しており、機敏な追従走行ではほぼ 45 度線上に乗っている。加速度の期待値と単純モデルとを比較しても、絶対値が大きい場合に加速度誤差が減少していることがわかる。従来のモデルを用いると加速度の絶対値を小さく推定してしまい、急ブレーキ等によって生じる交通コンフリクトがうまく再現できていなかったと考えられるが、運転意図推移統合型車両挙動モデルを用いるとより多くのコンフリクトが再現される可能性がある。また、運転意図推移統合型車両挙動モデルによって表現した場合、確率は低くとも一度条件が整えば大きな減速が長く続くといった現象も再現できる。

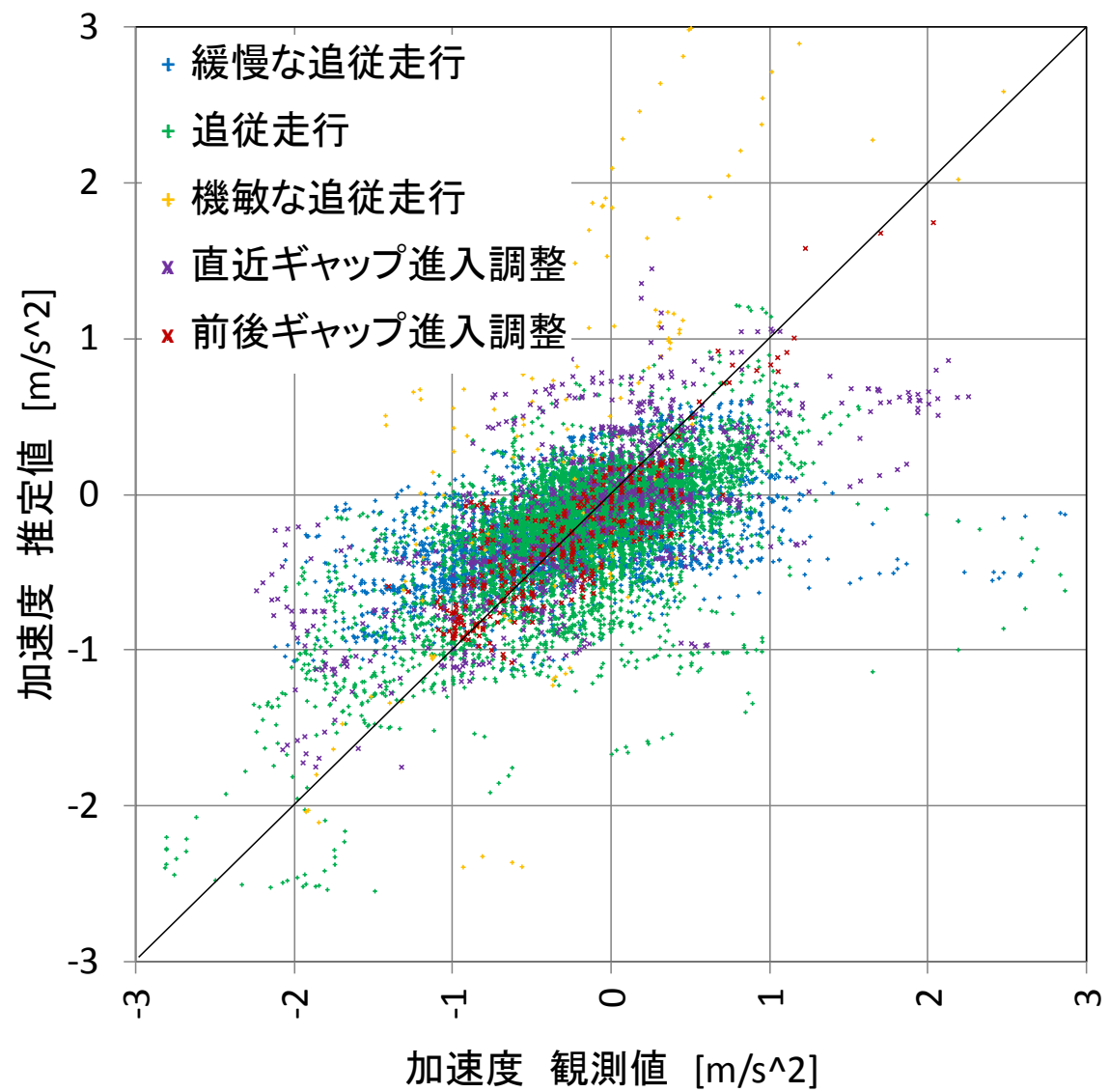


図 4.14 推定運転意図別 加速度誤差

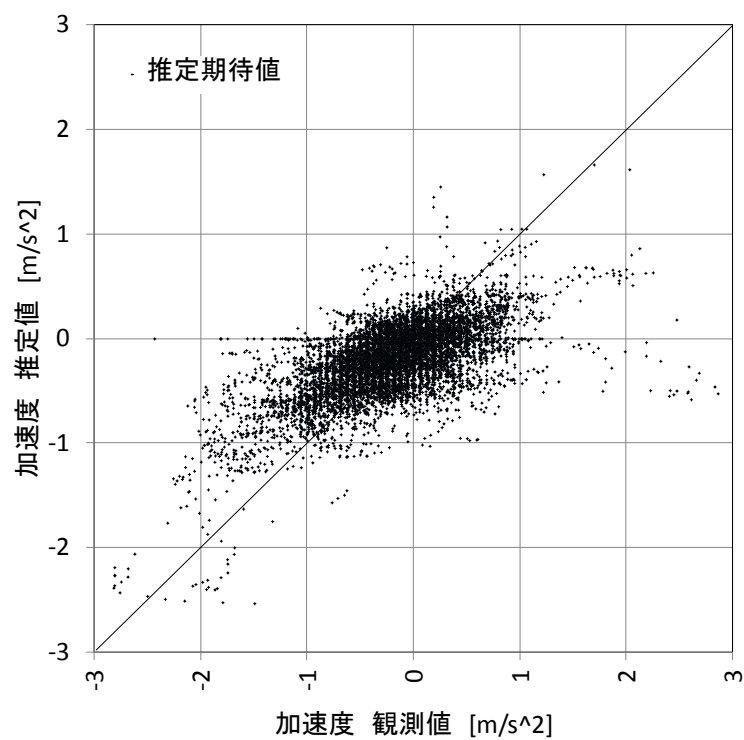


図 4.15 運転意図推移統合型車両挙動モデル加速度期待値誤差

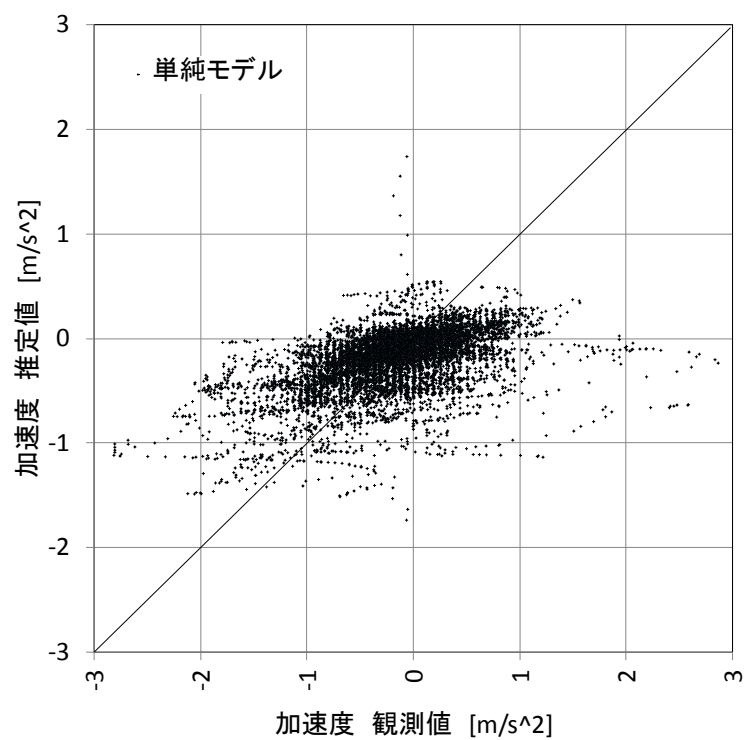


図 4.16 単純モデル加速度誤差

表 4.9 の重回帰推定パラメータ値を推定運転意図毎に比較してみても、各推定運転意図間で傾向が異なっていることがわかる。相対値は自車両の値を引いたものであり、周囲の車両が前方に行くほど大きな値となる。そのため、相対値に対する推定パラメータは基本的に正の値として推定されることが想定され、有意に影響の出るパラメータのほとんどが正の符号をもつ。

表 4.9 重み付き重回帰推定パラメータ

説明変数	追従走行			機敏な追従走行		
	パラメータ	P値		パラメータ	P値	
定数	4.8E-01	6.9E-17 ***		-1.2E+01	0.0E+00 ***	
対象車両速度	-3.5E-02	4.5E-18 ***		1.0E+00	7.2E-18 ***	
直前方車両相対速度	1.6E-01	0.0E+00 ***		9.1E-01	0.0E+00 ***	
直前方車両相対距離				-1.6E-01	1.8E-17 ***	

説明変数	直近ギャップ進入調整			前後ギャップ進入調整		
	パラメータ	P値		パラメータ	P値	
定数	1.5E+00	3.1E-17 ***		5.2E+00	2.6E-17 ***	
対象車両速度	-3.1E-02	0.0E+00 ***		-1.2E-01	5.7E-17 ***	
直前方車両相対速度	6.0E-02	0.0E+00 ***		-4.2E-02	3.9E-17 ***	
直前方車両相対距離	-5.0E-03	0.0E+00 ***		1.6E-03	0.0E+00 ***	
進入先前方車両相対速度	1.7E-02	6.5E-09 ***		6.9E-02	3.5E-19 ***	
進入先前方車両相対距離	-7.6E-03	4.0E-17 ***		-2.2E-03	6.2E-17 ***	
進入先後方車両相対速度	-2.8E-03	1.7E-01		4.2E-01	5.9E-17 ***	
進入先後方車両相対距離	2.7E-03	0.0E+00 ***		7.2E-02	0.0E+00 ***	
進入先前方車両非存在ダミー	2.2E-01	4.8E-17 ***		3.2E-01	0.0E+00 ***	
進入先後方車両非存在ダミー	-4.9E-01	0.0E+00 ***		-3.1E+00	0.0E+00 ***	

説明変数	緩慢な追従走行			車線変更実行		
	パラメータ	P値		パラメータ	P値	
定数	1.1E+00	1.8E-17 ***		7.7E-01	5.1E-17 ***	
対象車両速度	-6.5E-02	0.0E+00 ***		-4.2E-02	2.0E-17 ***	
直前方車両相対速度	1.1E-02	1.3E-10 ***		-1.8E-03	0.0E+00 ***	
直前方車両相対距離	-3.2E-04	1.2E-04 ***		-8.7E-05	1.8E-06 ***	
進入先前方車両相対速度				8.6E-06	2.5E-02 **	
進入先前方車両相対距離				1.4E-04	3.0E-01	
進入先前方車両非存在ダミー				-8.8E-03	3.1E-01	

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

直前方車両の相対速度に対する係数は前後ギャップ進入調整と車線推移実行以外すべて正となり、車線推移実行以外には基本的な追従挙動が含まれていると考えられる。その値としては、機敏な追従走行、追従走行の順に大きく、先にも述べたように前方車両への

感度の高い走行であることが確認できる。

一方、車線推移調整段階に相当する推定運転意図である、直近ギャップ進入調整と前後ギャップ進入調整の推定パラメータには符号が異なるものがいくつか存在しており、異なる運転行動がみられていることがわかる。また、全体的な傾向として、有意になるパラメータ、値の大きくなるパラメータを比較すると、進入先の車線上の車両に対しては相対距離に反応しており、直前方車両に対しては相対速度に反応していることが読み取れる。これは、直前方車両に対しては追従し、進入先の車線上の車両は回避しようとする傾向が表れていると予想される。

4.4.3.b. 運転意図推移推定結果

運転意図推移に関するパラメータは表 4.10 からわかるように、半数程度が有意な値として推定された。有意に推定されなかったパラメータが存在する理由は、モデル構造が多少複雑であり、尤度関数に対する感度がパラメータ毎に大きく異なっているためである。説明変数に用いた車線残り距離は合流地点までの距離、目標車線ダミーは車両が最後に観測された時点における車線（目標車線）に近づく方向の推移なら 1、遠ざかる推移なら-1、それ以外が 0 となるダミー変数である。表中のパラメータ値の背景を塗った同一説明変数に対するパラメータ同士は、推移元と推移先の推定運転意図が反転しているパラメータである。これらのパラメータ同士は、符号が反転していることから、影響が出る方向が安定しており、推定確率が振動することがないことを示している。この推定結果はおおむね想定通りであり、当該部分の推定運転意図の推移に関しては仮定した構造が妥当であったことを示唆している。

表 4.10 運転意図推移推定パラメータ

推移元→推移先:説明変数	パラメータ	標準偏差	T値
緩慢な追従走行→追従走行:			
定数	1.1	4.5E-01	2.6E+00 ***
直前方車両相対距離	-0.1	1.0E-03	-1.2E+02 ***
追従走行→緩慢な追従走行:			
定数	-0.2		
直前方車両相対距離	-0.3		
緩慢な追従走行→機敏な追従走行:			
定数	87.8	3.7E+02	2.4E-01
直前方車両相対距離	-28.2	1.2E+02	-2.4E-01
機敏な追従走行→緩慢な追従走行:			
定数	-1.3		
直前方車両相対距離	-9.3		
緩慢な追従走行→直近ギャップ進入調整:			
定数	-0.7	3.5E-01	-2.1E+00 **
進入先前方車両相対距離	0.0	7.4E-03	-4.5E+00 ***
進入先前方車両非存在ダミー	-0.5	1.2E+00	-4.2E-01
目標車線ダミー(車線変更)	10.5	1.7E+00	6.2E+00 ***
車線残り距離(合流)	2.0	4.0E+00	4.9E-01
直近ギャップ進入調整→緩慢な追従走行:			
定数	-5.7	2.4E+00	-2.4E+00 ***
進入先前方車両非存在ダミー	-1.1	9.5E+00	-1.1E-01
目標車線ダミー	-0.1	5.1E+00	-2.7E-02
直近ギャップ進入調整→前後ギャップ進入調整:			
定数	2.2		
進入先後方車両相対距離	6.5		
進入先後方車両非存在ダミー	0.1		
前後ギャップ進入調整→直近ギャップ進入調整:			
定数	-5.7		
進入先後方車両相対距離	-3.6	6.9E+00	-5.2E-01
進入先後方車両非存在ダミー	0.9		
直近ギャップ進入調整→車線変更実行:			
定数	4.2		
進入先後方車両相対距離	4.5		
進入先後方車両非存在ダミー	2.2		
目標車線ダミー	-3.8		
車線変更実行→緩慢な追従走行: 定数	-3.2	1.5E-01	-2.1E+01 ***

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

車線推移調整段階においてギャップ選択が適切に運転意図推移によって表現されているかを分析するために、車線推移開始までの推定運転意図の変化を図 4.17 に示す。図は車線変更時点を 0 秒として横軸の一番右にとり、横軸を左に行くにしたがって、時間を遡った時点での各推定運転意図の割合を示している。図より車線推移開始 5~6 秒前から前後ギャップ進入調整の推定運転意図が多くなることが読み取れる。一方で、緩慢な追従走行の運転意図は 5~6 秒前から減少するように推定されている。車線変更前に何らかの判断を行い、速度調整後、車線変更をしていると考ええると、この 5~6 秒前において何らかの判断を行っているとは推察される。これは既存の研究における知見[70]とも一致しているといえる。

図 4.18 には、例としてある 1 車両の推定運転意図状態確率の推移を挙げている。この例では、図の 0~60m 地点において右車線に推移し、190~260m 地点において元の車線に戻る推移をしている。2 回の車線変更の間の区間は、ほぼ全域にわたって 2 回目の車線変更に対応した速度調整を行っていると考えられ、推定運転意図が前後ギャップ進入調整、直近ギャップ進入調整と推移している。また、開始から 25 秒後以降では、機敏な追従走行に推移する現象もみられる。このような連続した推定運転意図の推移がみられるのも、運転意図推移統合型車両挙動モデルの特徴である。

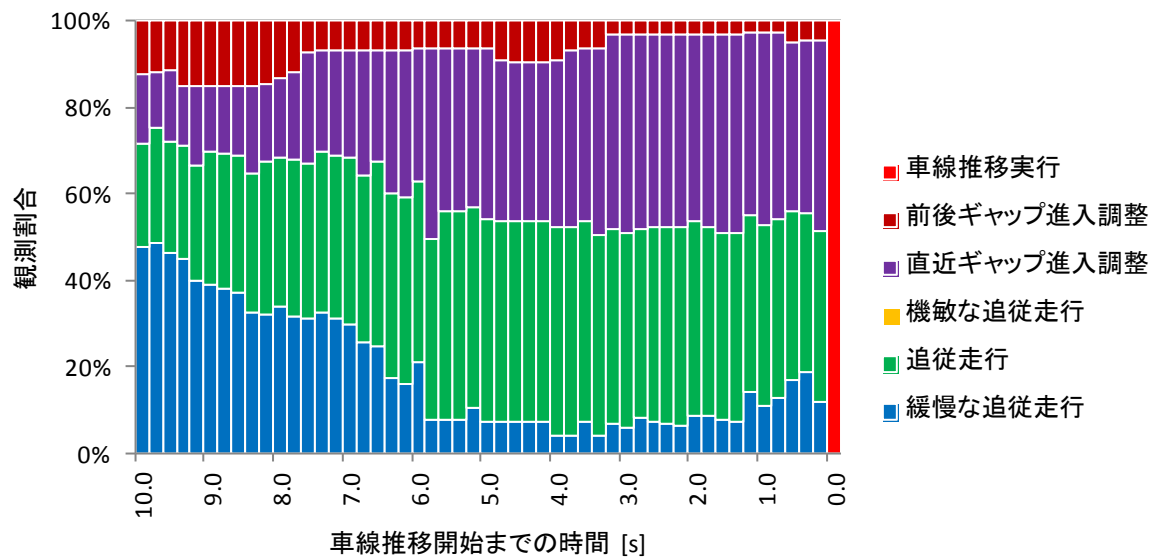


図 4.17 車線推移開始までの推定運転意図の変化

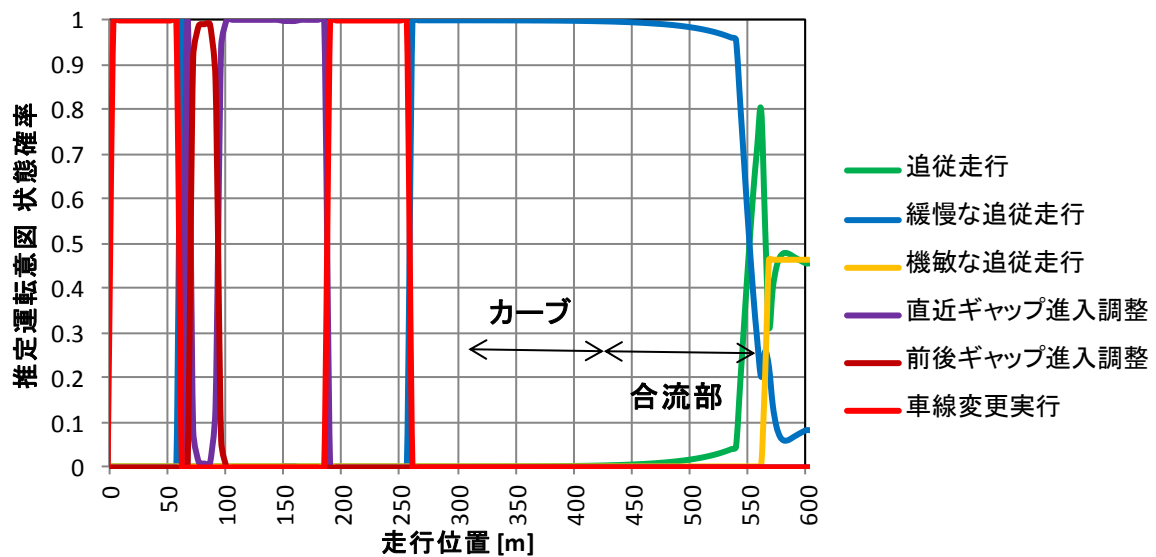


図 4.18 運転意図推移例

最後に推定運転意図と線形の関係について考察を行う．図 4.19，図 4.20 は環状線，守口線を走行した車両の推定運転意図を道路線形に沿って集計したものである．特に環状線を走行する車両はカーブ手前の直線区間で緩慢な追従走行が増加し，合流部に近づくにつれてより機敏な追従走行に切り替えているように推定されている．また，機敏な追従走行は，環状線・守口線ともに合流部後半に分布しており，合流部において危険を伴った場合に，対応する走行がみられたと考えられる．

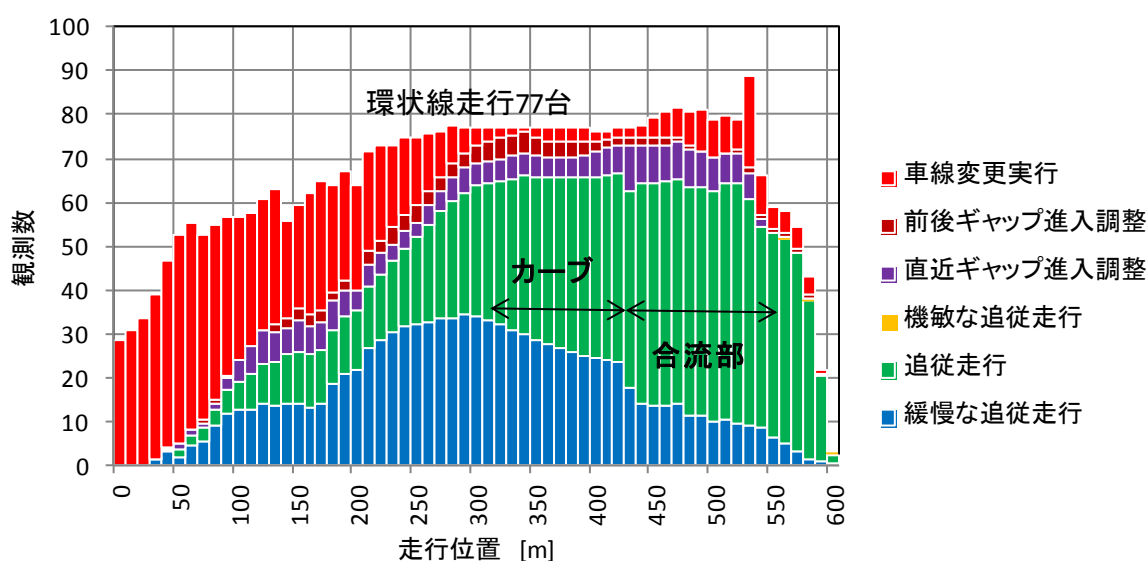


図 4.19 推定運転意図状態確率の合計（環状線走行車両）

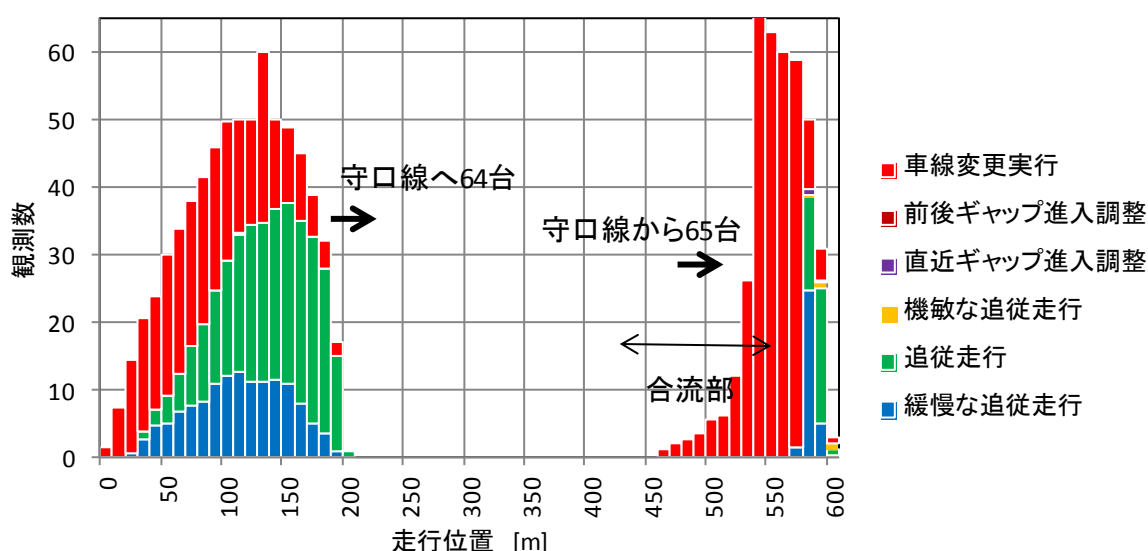


図 4.20 推定運転意図状態確率の合計（守口線流出・流入車両）

4.5. まとめ

本章では 2 つの運転意図推移構造の運転意図推移統合型車両挙動モデルに対するパラメータ推定を行い、モデルの特徴について考察を行った。

いずれの運転意図推移構造における推定結果からも、運転意図推移統合型車両挙動モデルは運転挙動を適切に分割しつつ、従来の単純なモデルと比較して、交通コンフリクトを再現する上で重要な要因である大きな加減速にも対応した加速度の算出が可能であることが示された。これは、前方車両が接近した場合は前方車両に対する感度が高い追従走行、前方車両と離れた場合は前方車両に対する感度が低い追従走行を行うという車両挙動が、運転意図推移統合型車両挙動モデルの構造によって適切に表現されたためである。

また、車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造に対する推定結果からは、車線変更に関するドライバーの選択行動と運転意図の推移が対応していること、線形に応じて対応する推定運転意図がみられることが示された。

本章における結果は、今後、推定データの拡充、及び、運転意図推移構造を洗練することによって、運転意図推移統合型車両挙動モデルの表現力が改善され、ドライバーの運転意図をある程度推測できるようなモデルとなる可能性を示唆している。

ただし、本章で推定した運転意図推移構造と説明変数は、結果の解釈の容易性も考慮して単純なもののみを扱ったため、未だ潜在状態の推移という構造の利点を示し切れていない。運転意図の推移の表現には相対距離指標のみを用いており、相対速度等の他の説明変数を導入する余地がまだ存在する。一方、ドライバーの選択行動を想像すると、一度、運転意図を決定した場合、直ぐに他の運転意図を持つとは考えにくい。すなわち、運転意図の推移に何らかの抵抗があると考えられる。この抵抗によって運転操作の遅れが生じるとも考えられるため、運転意図推移統合型車両挙動モデルに運転意図の推移に対する抵抗項を導入することが今後の課題である。

また、車線変更・合流を考慮した運転意図推移構造では、全ての説明変数が想定通りの符号を示してはならず、運転意図の推移構造に改善の余地がある。推定したモデルの一部の運転意図に対しては、依然として加速度モデルの適合度が高くないものも存在する。この結果はドライバーの運転意図が分類し切れていないことが示唆しており、他の種類の意図の導入が望まれる。さらに、1 変数では 3 つ以上の意図に分離することが難しいので、運転意図の種類を増加させる場合、相対速度等の説明変数を新たに導入することが必要となるであろう。加えて、一部の加速度算出モデルに関しても、既存研究等を踏まえた改善が望まれる。

参考文献

- [69] Kurauchi, F. : Queiroz, I. N. F., Iida, Y. and Higatani, A. : Traffic flow analysis using image processing technique, Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Vol. 2, pp. 329-338, 2006.
- [70] Yanagihara, M. , Uno, N. , Shimamoto, H. , and Shiomi, Y. , 'Integrated driving behavior model considering the driver's latent intention', Transportation and Geography, Proceedings of the 16th International Conference of Hong Kong Society for Transportation, pp.27-34, 2011.

5. 運転意図と車両挙動との関係の実証的分析

5.1. はじめに

ドライバーの持つ運転意図を知ることは、ドライバーへの特定の反応、例えば危険を感じて減速するなどの反応を期待する多くの交通対策を検討するうえで重要な研究課題である。しかし、第3章、第4章で述べた通りに運転中にドライバーがどのような運転意図を持っているのかを、車両軌跡等の外部観測データから推定することは可能であっても、ドライバーのもつ運転意図の真値を取得することはできない。すなわち、外部観測によるドライバーの思考の分析には限界が存在する。例えば、運転意図のように車両挙動における様相の違いを表す要素に着目し運転者の心理状態を心拍指標[71]や視線情報[72]から推定している研究も存在するがドライバーの意図そのものを取り扱っている訳ではない。

運転意図を明示的に扱うためには、運転意図と車両挙動の対応関係についての一般的な知見を積み重ねてゆく必要がある。その第一歩として、本章では、運転後のドライバーに直接インタビュー調査を行うことによって、運転時にどのようなことを考えていたのかに関する情報を、表明運転意図という形で取得し、運転時の車両挙動と比較することを通して、表明運転意図とドライバーの運転操作との対応関係について分析を行う。言い換えれば、表明運転意図の変化に伴い車両挙動に明確な変化が生じた場合、あるいは、車両挙動に何か特徴的な変化が観測された場合、そのときの表明運転意図は車両挙動の変化の前後で異なっている可能性が高いのか、といった点について着目し基礎的な分析を行う。

本章における表明運転意図と車両挙動と比較分析は、運転意図推移統合型車両挙動モデルの構造に関する「異なる車両挙動様態は異なる運転意図によって導かれる」という仮定の妥当性を裏付けるという目的も兼ねている。また、表明運転意図の種類と、表明運転意図間の推移構造の把握は、運転意図推移統合型車両挙動モデルに含める運転意図の数とその運転意図間の推移方向をとった運転意図推移構造の仮定に役立つ知見を整理する目的がある。

5.2. 既存のドライバーの意図の分析手法

ドライバーの意図を分析する研究として、運転中、または運転を振り返りながらドライバーに考えていることを喋ってもらう発話プロトコル法を用いて、運転中ドライバーがどのような意思決定を行っているのかについて知見をまとめた研究[73][74]が存在するが、少数の被験者を対象とした分析であるため、運転意図と車両挙動との対応関係についての知見は得られていない。

そこで、本研究では、ドライビングシミュレータ（以下 DS と略記）を用いた走行実験に参加した被験者を対象として、走行実験終了後に運転時のビデオ画像を見てもらいながら、筆者自らが直接インタビュー調査を行うことによって、運転時の運転意図を調査する。

このインタビューによって得られた表明運転意図と、ドライバーの運転操作およびその結果としての車両挙動との対応関係の有無についての知見を整理する。

5.3. 実験概要

5.3.1. DS 走行実験概要

本研究では周囲の車両の走行状況を統制して複数回の走行を行うことが可能であり、走行時の自車両及び周辺車両の状況に関する情報が入手しやすいという利点を考慮し、DS 実験を行い、DS 実験終了時にインタビューを通して表明される運転意図をデータとして取得することを試みた。本インタビューで取得を試みる表明運転意図に関する情報には、既存のドライバーの思考・意思決定を把握する手法と比較して、以下の2点の特徴がある。

- (a) 時間的に連続した情報として表明運転意図を取得可能である。
- (b) 一走行中に異なる表明運転意図が観測される場合、その変化時点を把握可能である。

このように表明運転意図を時系列的に把握するために、DS 実験終了後、実験時の状況を別室でビデオ映像によって振り返り、時間を確認しながら、インタビューが被験者に走行時の運転意図を質問する形式を採用した。

DS 実験では、予備的な走行を含め2~4回の短区間の走行を5セット、計15回の走行を行い、5セットそれぞれの中で最後の走行（計5回）についてインタビューを行った。その走行実験の概要を表5.1に示す。いずれも都市高速道路上での走行を想定した実験であり、終始、前方車両に追従する形の走行を行った。

実験順	道路形状	全長	前方車両	車線変更など	主な警戒喚起情報板
2	仮想単車線テストコース	約4km	2台	無	無
5	阪神高速2号 淀川左岸線の 正連寺川ONランプ合流地点前後	約2km	1台	ONランプで 1台合流	追従型情報版
8					設置型情報版
12					追従型情報版(無点灯)
15	阪神高速1号 環状線の 12号守口線分流・合流地点前後	約2km	複数	合流部で 複数台合流	無

表 5.1 各走行実験の概要

実験順に関してはインタビュー調査の対象となっていない走行も含めた走行順を記載している。本章では表5.1の5回の走行実験を、1番目~5番目の走行実験と呼ぶ。

インタビュー調査の対象となった1番目の走行実験は、図5.1、図5.2に示す道路線形の単車線道路上を3km以上にわたって、前方車両に追従する走行である。図5.2の走行位置はDS上で道路に沿って定義された座標であり、その値が増加する方向へ車両は走行する。

追従対象となる前方車両は途中、カーブ手前の 1780m 地点において急減速したのちに、徐々に加速するといった速度変化をつけており、被験者が前方車両の速度変化に対応することを誘発すよう設定した。1 番目の走行実験は被験者が DS における追従走行に完熟するための走行という位置づけもあるが、本研究では前方車両に対する被験者の反応に着目している。以降、この走行区間を「テストコース」と呼ぶ。

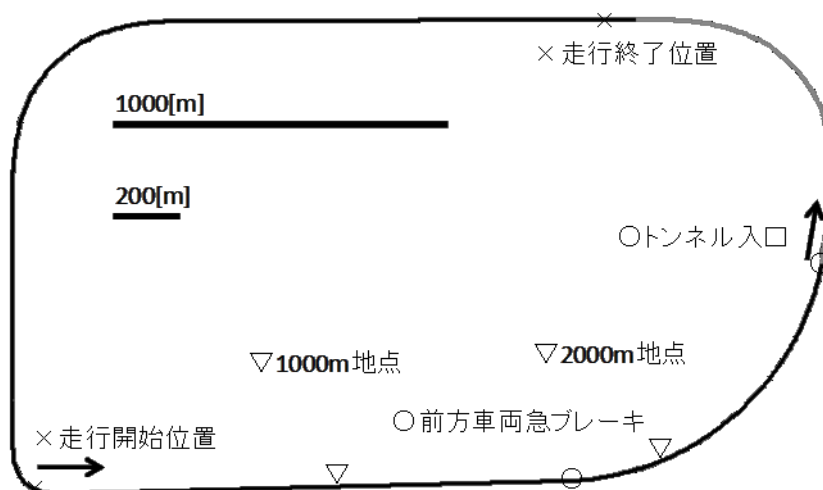


図 5.1 テストコース道路鳥瞰図

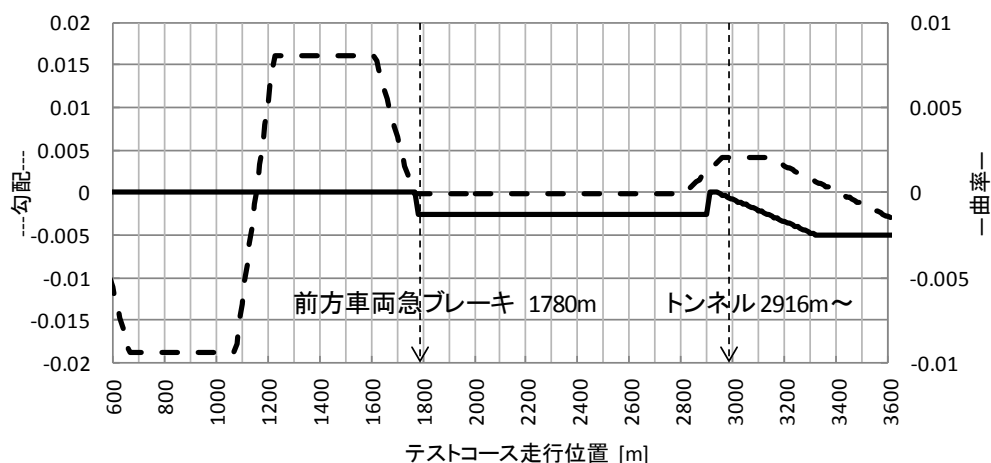


図 5.2 テストコース道路線形図

インタビュー対象となった 2～4 番目の走行実験では、図 5.3、図 5.4 に示す阪神高速道路 2 号淀川左岸線の正蓮寺 ON ランプ前後の約 1.5km を模した道路を用いている。ON ランプ合流部の手前では円滑に合流が進行することを目的とした情報提供板を設けた。その情報提供板による情報提供の条件を変えつつ走行実験を 3 回行った。以降はこの時の道路線形を「淀川左岸線」と称する。この 2～4 番目の走行では、走行開始時から前方に車両を

走行させ、合流車両は当該前方車両と自車両との間、または自車両の後ろへ合流するように設定した。なお、走行した淀川左岸線は2車線の高速道路であったが、被験者には車線変更を禁止し、走行車線を常に走行するように指示した。

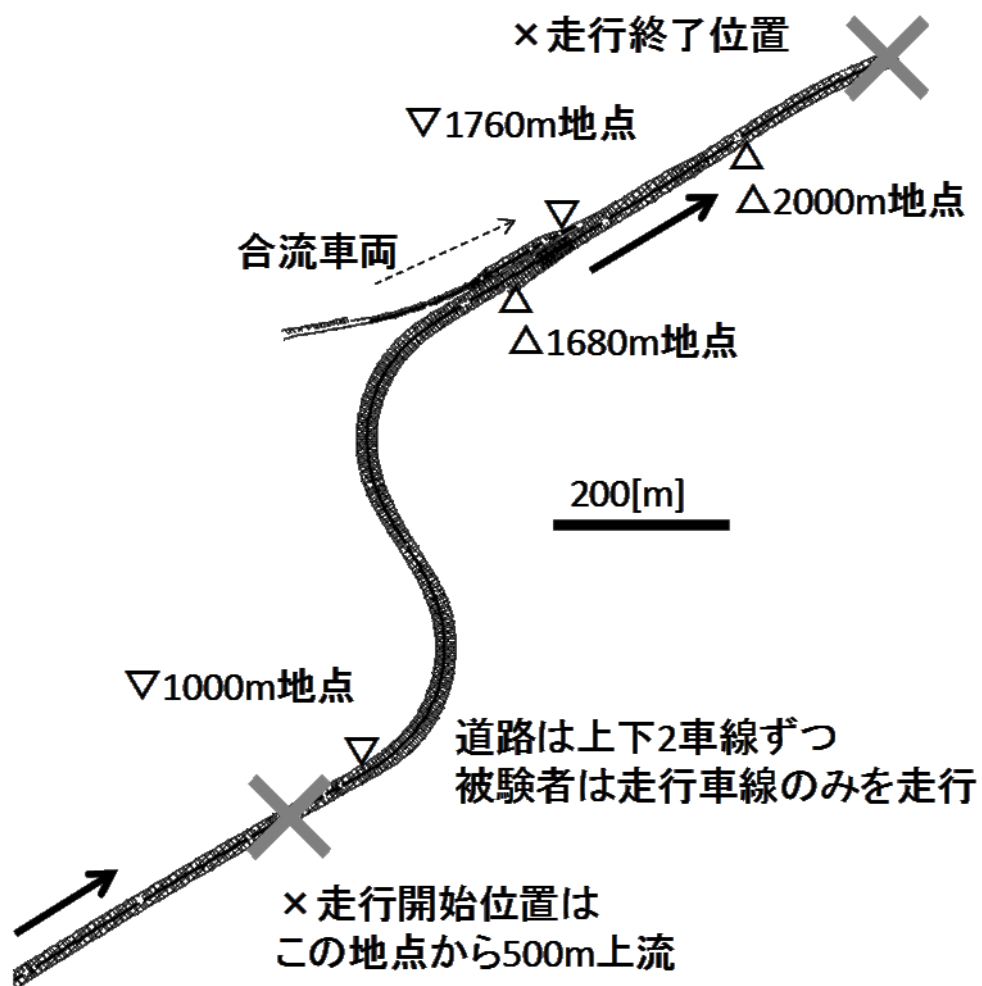


図 5.3 淀川左岸線道路鳥瞰図

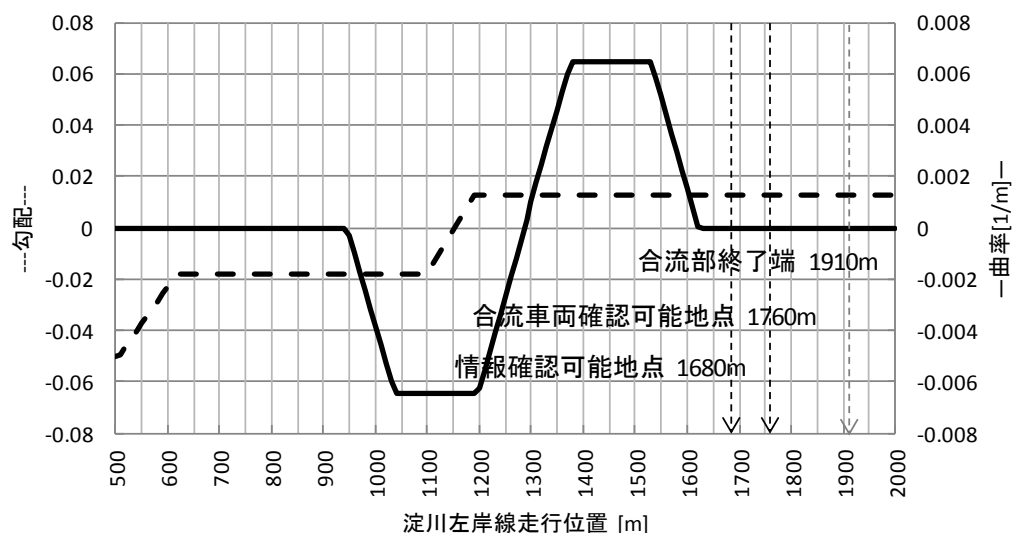


図 5.4 淀川左岸線道路線形図

2～4 番目の走行実験では全て、合流部において合流車両が合流してきており、合流車両の接近を知らせる複数種類の情報提供の効果把握するための走行実験となっている。各情報板が点灯し始める時点は、被験者車両が図 5.4 の 1680m 地点を通過した時点に設定しており、図 5.4 の 1760m 地点までの 80m の間、情報提供が続く。半数の被験者に対してのみ 2 番目の走行実験において、情報提供のタイミングを分析する目的で、その他の実験設定よりも上流に合流車両を発生させ、追従型情報板の点滅と合流車両との位置関係が異なるような設定としている。

情報提供位置において、2 番目の走行実験では図 5.5 に示すような側壁に埋め込まれた複数の情報板が合流車の走行位置に同期した形で点灯し、合流車の接近を知られる情報提供を行っている。3 番目の走行実験には、図 5.6 に示す側壁に設置された情報提供板による情報提供、4 番目の走行実験では 2 番目と同じ情報板が設置されているものの、情報板が点灯しないという条件下での走行を行った。2 番目、4 番目の走行実験における情報板を本研究では「追従型」、3 番目の走行実験における情報板を「設置型」と呼んでいる。なお、4 番目の走行実験に対するインタビューは時間の都合上、1500m 地点以降の合流区間前後のみを対象として、インタビューを行った。本研究では 2～4 番目の走行実験において提供される合流部の運転支援情報の提供が運転意図の変化に及ぼす影響に着目したより詳細な分析を第 6 章において行っている。



図 5.5 追従型情報板



図 5.6 設置型情報板

最後のインタビューの対象となった 5 番目の走行実験で用いた道路線形を図 5.7，図 5.8 に示す。これは阪神高速 1 号環状線の 12 号守口線との分流・合流地点前後を模した仮想道路であり，第 4 章においてモデルパラメータ推定に用いた車両軌跡の取得範囲を覆うように，阪神高速第 1 号環状線の 12 号守口線分流地点の手前から，合流地点の下流 1km 程度の位置までを設定した。図中の走行位置の座標は車両軌跡データの座標と一致するように設定している。また，周囲の車両は上記の分流・合流地点前後の道路上で画像観測により取得している実際の車両軌跡に基づき，シミュレータ内でモデル車両を動かしたものとなっ

ている．なお，この道路線形での走行時のみ，被験者に車線変更を許す設定としており，本研究では実際の交通流に近い状況の中で，どのような車線遷移が観測されるのか，その車線遷移に対応してどのような運転意図が観測されるのかに着目する．以降，当該道路線形を「環状線」と略称する．

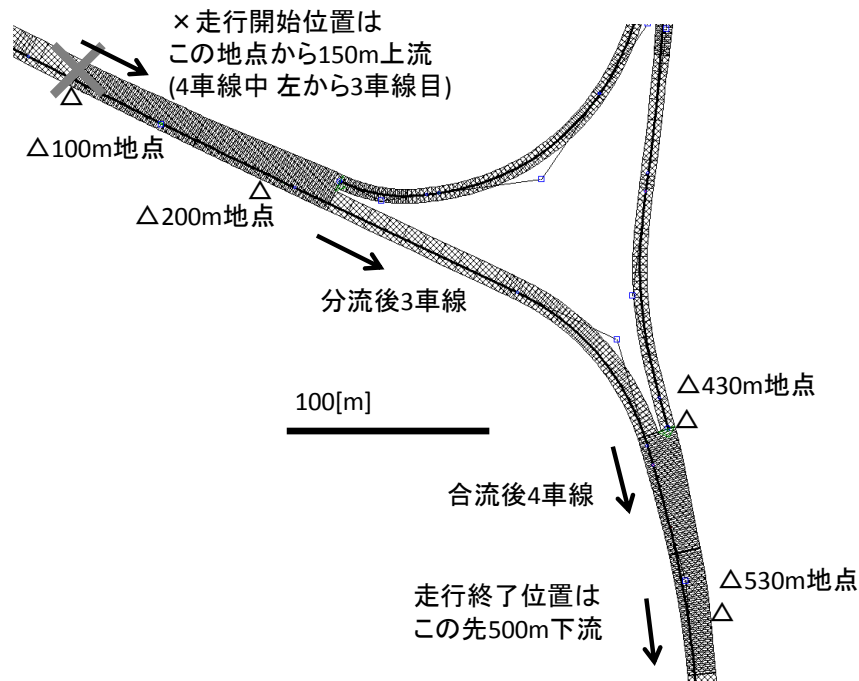


図 5.7 環状線道路鳥瞰図

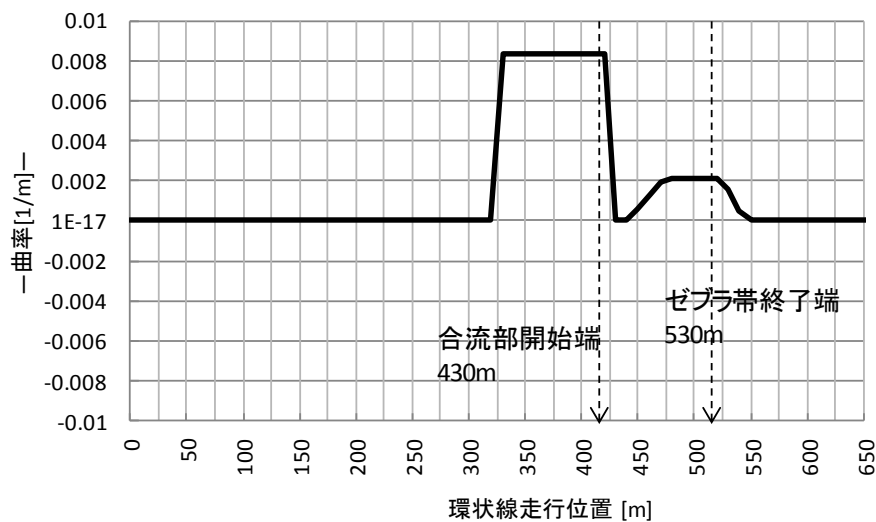


図 5.8 環状線道路線形図

5.3.2. インタビュー調査概要

被験者へのインタビューは図 5.9 のような回答結果を得るため、各走行実験時の DS モニターの様子を写したビデオ映像を 20 秒ずつ再生・停止しながら、停止のたびに「この間どのような方針で運転していましたか」と運転意図を尋ね、比較的自由に回答してもらった。さらに、20 秒間隔で取得したインタビュー結果として、その間に運転の方針が変化している場合、再度ビデオ映像を再生しながら被験者に 20 秒の中のどの時点で方針を変化させたのかを指摘させた。例えば、「速度を上げるためにアクセル踏んでいた」という回答が得られた 20 秒後に「前の車が近づいたので減速した」という回答が得られた場合、その前後の映像を再生し、減速しようと思い始めた時点を被験者に特定してもらうように誘導した。

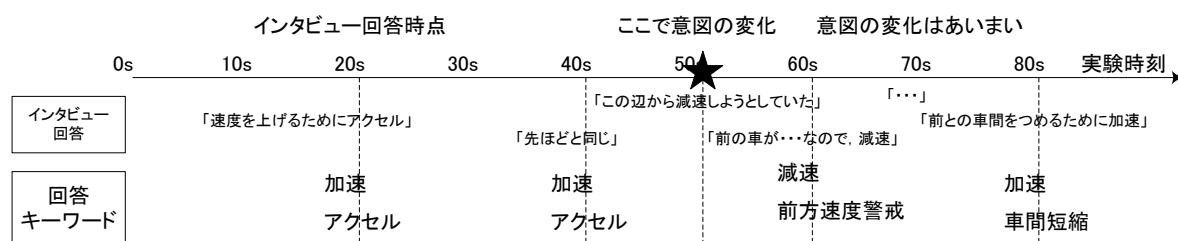


図 5.9 インタビュー回答例

これら DS 実験およびインタビューは表 5.2 に示す広範囲の属性の計 57 名の被験者に対して行った。また、自動車運転頻度、特に阪神高速の利用頻度が高い被験者を優先的に実験に参加させている。自動車運転頻度の被験者平均は週 3 回程度であった。また、阪神高速の利用に関しては全く利用しない被験者が 12 名含まれるものの、利用頻度の平均は年 2 回程度であった。

表 5.2 属性別被験者数

	男性	女性	計
20代	18	1	19
30代	4	1	5
40代	11	1	12
50代	1		1
60代	7	7	14
70代	4	2	6
計	45	12	57

5.4. 表明運転意図の分類

5.4.1. インタビューの回答内容

インタビュー調査の各 20 秒間隔、各被験者に対するはじめの質問は「この 20 秒の間どのような方針で運転していましたか」という同一の内容であるが、その後は自由な発言を促す半構造化インタビューとなっている。半構造化インタビューは事前に大まかな質問事項を決めておき、回答次第で以後の質問を柔軟に変えてゆく調査方法であり、走行実験の合間を利用して行った本インタビューのような長い時間を確保できない場合に効果的な手法である。被験者によっては回答の内容が、DS 搭乗時の感想等、質問者の意図した内容と大きく異なる場合もあったので、運転意図を含む内容になるように適宜誘導した。結果的に、時間の情報以外の回答の意味内容自体は構造化されていない、直接統計的な処理をする上で困難な部分も含まれる情報が得られた。この時のインタビューの回答例を図 5.9 に示す。

5.4.2. インタビュー回答の数値化

インタビューの回答から取得した情報から、相互比較分析が可能な程度の種類の運転意図に回答を集約した上で、どの時点でどの運転意図を持っていたのかを導く処理を行った。この処理では、インタビューから得られる運転意図という意味的な広がり、DS 走行に伴う時間的な広がりを集約する処理が必要となる。この 2 軸の集約過程と複数の運転意図に対応するグループ（以後、運転意図クラスタと呼ぶ）の取得に関する処理の流れを図 5.10 に示す。縦軸に時間がどの程度集約されたか、横軸にドライバーの運転意図の意味内容がどの程度集約されたかを示した概念図であり、右上に行くほど集約が進んだことを示している。

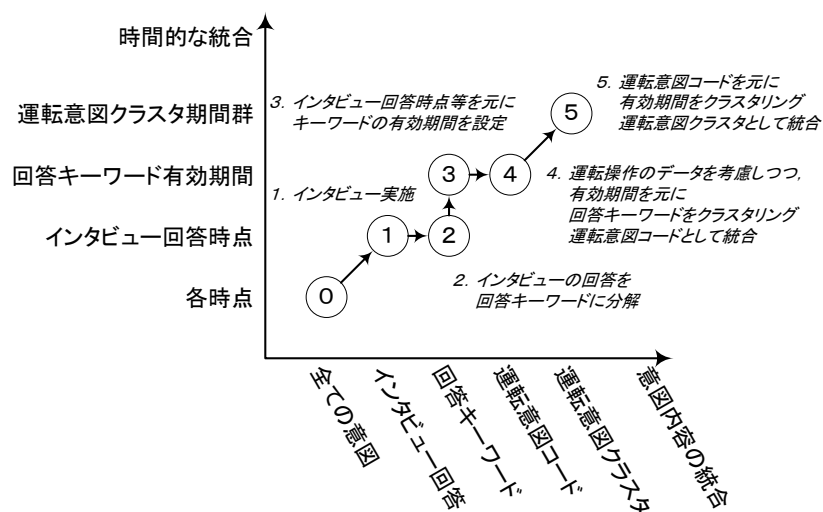


図 5.10 表明運転意図への集約過程

運転意図クラスターの抽出の第一の処理として、インタビュー回答内容をデジタル化するために、回答内容からキーワード抽出を行い、表 5.3 に示す 50 のキーワードを定義することで、全ての回答者の各時点での回答内容を代表できるようにした。（図 5.10 の第 2 の処理）

表 5.3 キーワードと運転意図コードの対応

キーワード（左から有効期間数が多い順）					運転意図コード	
1 自車速度警戒	2 楽/リラックス	3 車間短縮	4 アクセル	5 加速	→ 1	加速
6 減速	7 後方車両警戒	8 操作失敗	9 困惑/後悔	10 前方速度警戒	→ 2	減速
11 ブレーキ	12 合流待機				→ 3	ブレーキ
13 弱ブレーキ	14 予想外				→ 4	弱ブレーキ
15 ついていく/追従	16 車間調整	17 自然減速	18 前方車両警戒	速度抑制 20 安全走	→ 5	追従
21 通常走行	22 前方車両警戒	23 初期調整	24 車間延長	25 トンネル警戒	→ 6	前方警戒
26 急カーブ警戒	27 車線中央維持	28 カーブ警戒			→ 7	カーブ警戒
29 車間維持	30 速度維持	31 前方車両が見えない	32 弱アクセル	33 速度調整	→ 8	現状維持
34 ハンドリング	35 車間確保				→ 9	車間確保
36 相対速度縮小	37 断念/操作終了	38 合流車両車間警戒	39 合流車両警戒		→ 10	合流警戒
40 車両未接近確認	41 右車線変更要求	42 合流車両速度警戒			→ 11	周辺確認
43 左車線変更要求	44 周辺車両警戒				→ 12	周辺警戒
45 前方進入譲渡	46 焦燥/不安				→ 13	譲渡
47 車線変更警戒	48 回避走行				→ 14	回避
49 GapAcceptance	50 前方ギャップ選択				→ 15	車線変更

この 50 のキーワードは、被験者のインタビュー回答の内、運転操作にかかわる内容を可能な限り欠損なく抽出するよう設定した。なお、「前」「前方のクルマ」「前方車両」等、同一の対象物を示す単語は一つのキーワードとして、抽出段階で集約している。また、被験者の感嘆等も数個のキーワードに集約した。

次に、本研究で有効期間と呼ぶ、各キーワードが有効となる時間的な範囲を図 5.11 に示すように定義した。前述したように、インタビュー調査では運転意図の変化時点に関する情報も併せて取得しており、その情報を元に、表 5.3 のキーワードがどの期間に対して有効であるか判断し、同一のキーワードが有効な一連の期間とその時のキーワードをペアリングした情報を生成した。インタビューの基本単位である 20 秒間の中での意図の変化が明確に回答されていない場合、図 5.11 に示すように、当該の 20 秒間の時間的な起点から 10 秒間の間に連続的に意図が変化したものと仮定して運転意図の変化点を設定した。

回答キーワードを得た 20 秒ごとの時点の中間で重みづけした形で有効期間を設定した。結果的に、全被験者、全走行実験に対するインタビューの回答は 50 種類の有効なキーワードの組み合わせを伴う 2257 の有効期間へ変換された。（図 5.10 の第 3 の処理）

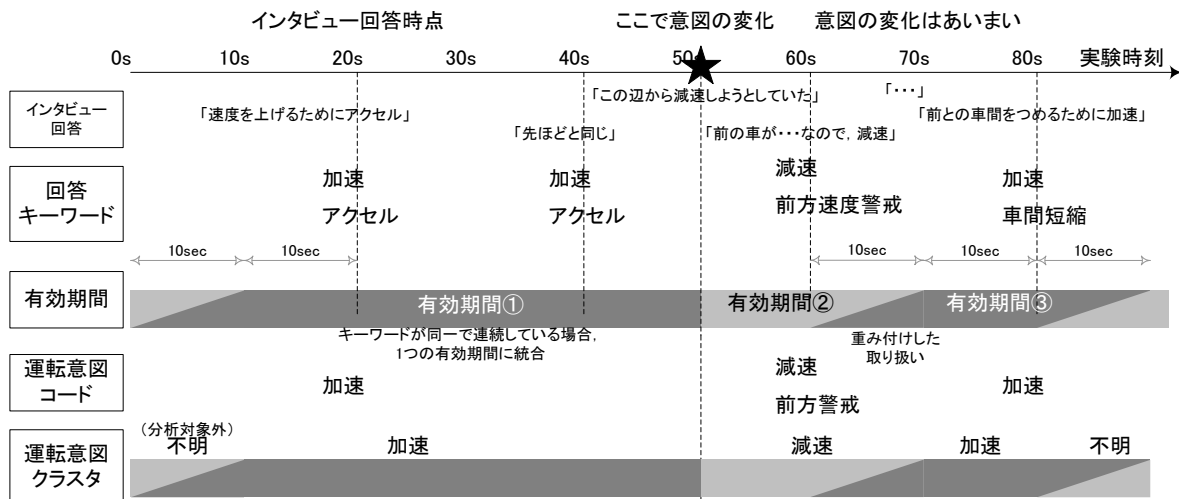


図 5.11 インタビュー回答例と有効期間の設定方法

表 5.3 に示す 50 のキーワードはインタビューの回答内容を概ね網羅できるよう多数のキーワードを設定したため、このデータを使って直接回答内容を複数の運転意図クラスに分類することは量的、質的に判断して妥当ではない。前方車両との間の調整に関する被験者の回答は多岐にわたっている一方で、本研究で着目しようと考えている車線推移に関する回答は少数である。すなわち、キーワードを直接用いて回答を分類すれば、主に前方車両との間の調整に関する項目に着目した分類となる傾向となり、車線推移に関する回答が分類に反映されない可能性がある。よって、インタビュー回答内容を複数の運転意図に分類するための適切な軸として、運転意図コードを設定する。

運転意図コード設定段階において、ドライバーのハンドル・アクセル・ブレーキ操作を表わす数値を参照している。各キーワードが対応する有効期間のドライバーの運転操作の統計値を基に ward 法に基づくクラスタリングを行った結果において同一のクラスに属する者同士で、キーワードの意味内容が矛盾しないもの同士を統合、表 5.3 に示すように 15 個の運転意図コードを作成している。（図 5.10 の第 4 の処理）

運転意図コードは統合元のキーワードの内、いずれかが有効であれば有効であり 1、対応するキーワードすべてが有効でなければ 0 となる 0-1 変数のコードとして扱っている。表 5.3 には統合された運転意図コードと元のキーワードの対応関係も示してある。なお、運転意図コードの名前に関しては、元のキーワードを参照して命名した。運転意図コードは 2257 の有効期間それぞれに対して定義される。例えば、図 5.11 のインタビューの回答例の中の 3 つの各有効期間に対しては、表 5.4 に示すような 15 個の 0-1 の運転意図コードが定義される。この 0-1 変数である運転意図コードの組み合わせを基に 2257 の有効期間を場合分けすると 264 通りになった。

表 5.4 インタビュー回答から取得した運転意図コードの例

開始 平均 [s]	終了 平均 [s]	加速	減速	ブレーキ	弱ブレーキ	追従	前方警戒	カーブ警戒	現状維持	保	合流警戒	周辺確認	周辺警戒	譲渡	回避	車線変更
5	52	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	65	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮														

5.4.3. 階層クラスタリングによる表明運転意図の分類

運転意図の分析を容易にするため、さらに 264 通りの運転意図コードの組み合わせをドライバーが運転意図の選択を行うときの選択肢程度の数に集約する．具体的には、運転意図コードを用いて、対応するインタビュー回答の有効期間に対して、ward 法による階層クラスタリングを行い、同等のインタビュー回答内容が得られている有効期間の集合である運転意図クラスタを生成する．本研究では階層クラスタリングの結果として、運転意図クラスタを 17 個生成し、それぞれのクラスタに属する被験者の回答は全てほぼ同等の運転意図を表すものと仮定している．（図 5.10 の第 5 の処理）

階層クラスタリングは、式(5.3)で表わされる運転意図コードから計算されるクラスタ間のユークリッド距離を用いた ward 法に基づく．

$$v^{s\ c} = \delta^{s\ c} / \sum_{c' \in C} \delta^{s\ c'} \quad (5.1)$$

$$Size(A) = \sum_{s \in A} \sum_{c \in C} \left(v^{s\ c} - \frac{\sum_{s' \in A} v^{s'\ c}}{\sum_{s' \in A} 1} \right)^2 \quad (5.2)$$

$$D(A, B) = Size(A \oplus B) - Size(A) - Size(B) \quad (5.3)$$

・変数定義

$D(A, B)$: 有効期間の集合 A と B とのユークリッド距離

$s \in A$: 有効期間の集合 A に含まれる各有効期間

$c \in C$: 15 種類の運転意図コード

$\delta^{s\ c}$: 有効期間 s の回答から運転意図コード c が得られていれば 1, 得られていなければ 0 となるダミー変数

クラスタリングの際の樹形図を図 5.12 に示す．各要素は 2257 の有効期間であり，運転意図コードの 0-1 変数の組み合わせをもとにクラスタリングを行っている．図 5.12 では有効である運転意図コードを表 5.3 の順に灰色の単形で表現している．クラスタリングの結果，表 5.5 に示す 17 の表明運転意図と呼ぶクラスに各有効期間は集約された．

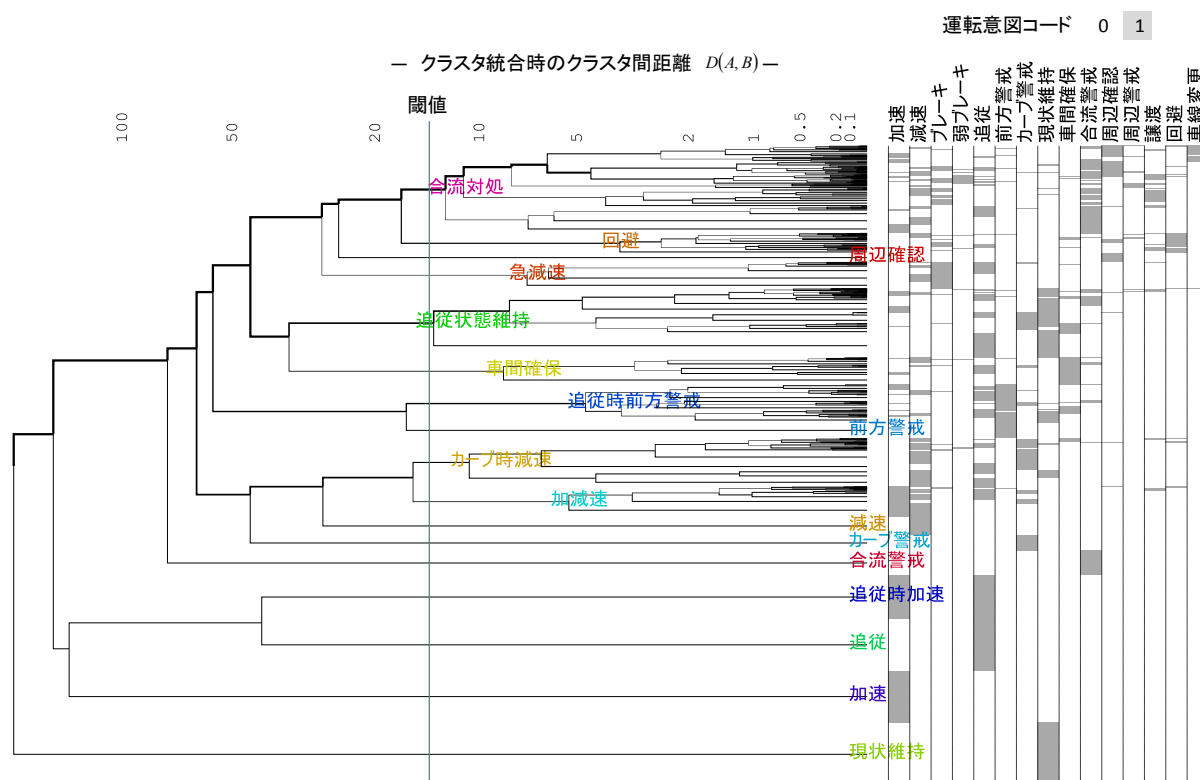


図 5.12 階層クラスタリングにおける樹形図

表 5.5 表明運転意図と表明運転意図グループ，運転意図コードの対応（0.5 以上）

グループ名	表明運転意図名	取得 期間数	対応運転意図コード														
			加速	減速	プレーキ	弱プレーキ	追従	前方警戒	カーブ警戒	現状維持	車間確保	合流警戒	周辺確認	周辺警戒	譲渡	回避	車線変更
合流警戒グループ	1 合流対処	308	0.23	0.30	0.23	0.12	0.26	0.13	0.51	0.43	0.13	0.57	0.23	0.81	0.29	0.19	0.15
	2 合流警戒	85										1					
	3 周辺確認	30											1				
急減速グループ	4 急減速	71		0.57	1		0.42		0.19		0.15				0.13		
	5 回避	94		0.22	0.22	0.29	0.32	0.66			0.25	0.17	0.97	0.18	0.31	0.87	
減速グループ	6 減速	95		1													
	7 カーブ時減速	170		0.79	0.39	0.37	0.59		0.63	0.27	0.92	0.51			0.22	0.70	
	8 車間確保	64	0.14	0.29	0.77		0.38	0.25	0.14		1	0.46					
現状維持グループ	9 現状維持	244								1							
	10 追従状態維持	224	0.16	0.17	0.42		0.54	0.12	0.33	0.95	0.18	0.72	0.88	0.46	0.13		
	11 追従	182					1										
警戒グループ	12 加減速	107	1	0.80	0.27		0.35	0.14	0.19				0.55		0.29	0.27	
	13 カーブ警戒	56							1								
	14 前方警戒	133						1									
加速グループ	15 追従時前方警戒	56	0.15	0.25	0.27		0.52	0.98	0.20	0.24	0.22	0.17					
	16 追従時加速	155	1				1										
	17 加速	183	1														

運転意図コード同士の意味自体の関連性を数値で定義することは困難であり、本研究では、同じ有効な運転意図コードをいくつ持っているかで、インタビュー回答内容の関連性を数値化している。そのため、有効なコードが少ない運転意図コード組み合わせは独立した運転意図を表現している可能性が高い。よって、有効な運転意図コードが1つである有効期間のみで構成されるクラスタと、他のクラスタとが統合される場合が、閾値を大きく変化させても減少しないという条件のもと、従来通りクラスタ間の距離が飛躍的に大きくなっている部分に図 5.12 のような閾値を設定した。その時のクラスタが 17 存在する。

運転方針に関するインタビューの内容を対象として、上記の階層クラスタリングを適用して 17 に集約された運転意図を本研究では表明運転意図と呼ぶ。得られた表明運転意図の中には、被験者の回答方針等の違いにより、同じ運転意図を持っていたとしても、異なるキーワードが抽出される場合がある。そのため、17 の表明運転意図の中には、ほぼ重複する内容を表わす表明運転意図同士も存在すると考えられる。各表明運転意図の内容を表現する運転意図コードの時間的な割合を表 5.5 に示す。表中の 0 以上 1 以下の数値は、各表明運転意図に含まれる有効期間 s における運転意図コード 0-1 変数 $\delta^{s,c}$ のクラスタ内における時間平均である。言い換えれば、各運転意図クラスタに分類された全ての有効期間に関して、各運転意図コードが有効である時間的な割合を示すものである。例えば「追従時加速」の運転意図クラスタは、対応する全ての有効期間に対して加速と追従の運転意図コードのみが有効であり、対応するインタビューの回答はこれら 2 つの運転意図コードで表現されることを示している。なお、運転意図コードの値の空白は 0 を意味する。17 のクラスタに対応している運転意図コード 0-1 変数の時間平均をもとに各運転意図の名前を付けている。

また、17 の運転意図クラスタに基づき運転意図の推移を議論すると煩雑になりすぎる場合もあるため、それらを再度集約して 6 つの表明運転意図グループを作成している。表 5.5 では表明運転意図グループと各表明運転意図との対応関係も示している。6 つの表明運転意図グループは 17 の各運転意図に対応する車両挙動の加速度、車間距離等の統計値が類似しており、インタビューの意味内容が大きく乖離していない運転意図同士を統合し作成した。

なお、以降の分析では、文章中の表現と各表明運転意図を区別するため、「追従時加速」の例のように、表明運転意図は「 」書きにて表記している。また、各表明運転意図グループの名前には“グループ”を末尾につけることで区別する。

5.5. 表明運転意図と道路線形・走行条件との関係

5.5.1. 表明運転意図の空間的变化

本節では、道路線形および周囲の車両の挙動と、観測される表明運転意図の総数の関係について分析を行う。本走行実験において発生させた車両はすべて、事前に道路の位置に基づいて速度等が設定されているため、以降の分析では被験者車両の位置と表明運転意図の対応について言及する。

5.5.1.a. テストコース

まず、1 番目の走行実験であるテストコース走行時の観測された各表明運転意図の総数の変化について触れる。この走行実験に関しては、特に前方車両の速度変化に対する、追従車両を運転する被験者の表明運転意図の変化に着目する。図 5.13 に比較のためテストコースの道路線形を再掲し、図 5.14 にテストコース走行時に観測された全被験者の表明運転意図の変化を示す。インタビューの回答時点と走行位置は、被験者車両の速度によって変化し、被験者毎に異なる。特に実験走行の序盤と終盤において表明運転意図が観測されている被験者は少数であるため、図 5.14 に示した区間における観測された各表明運転意図の総数は、走行の序盤増加し、終盤に減少している。

1780m 地点において前方車両は急制動をかけており、その変化に対応する形で 1780m 地点の手前において、「急減速」が増加している。その後の走行では前方車両の急制動以前に比べて、「車間確保」の割合が増加し、「現状維持」が減少している。また、「急減速」を維持している被験者も相対的に多くなっている。これは一度急制動をかけた前方車両をより意識するようになったことを表わしていると考えられる。また、「加減速」も前方車両の急制動以降、割合が増加しており、急制動後の前方車両の速度回復に合わせて、速度を調整する意図を持つ被験者の増加を示している。2300m 地点では警戒グループ、加速グループの割合が急増している。これは、当該区間において、前方車両が大きく加速し、被験者車両との車間が大きく開いたためであると考えられ、そのことを認識し、速度回復の意図を有した被験者が多かったことを示している。トンネル内 3300m 地点前後においても前方車両は加速しており、2300m 地点前後と同様の表明運転意図の変化が前方車両の速度変化に応じた形で観測されることが示唆されている。

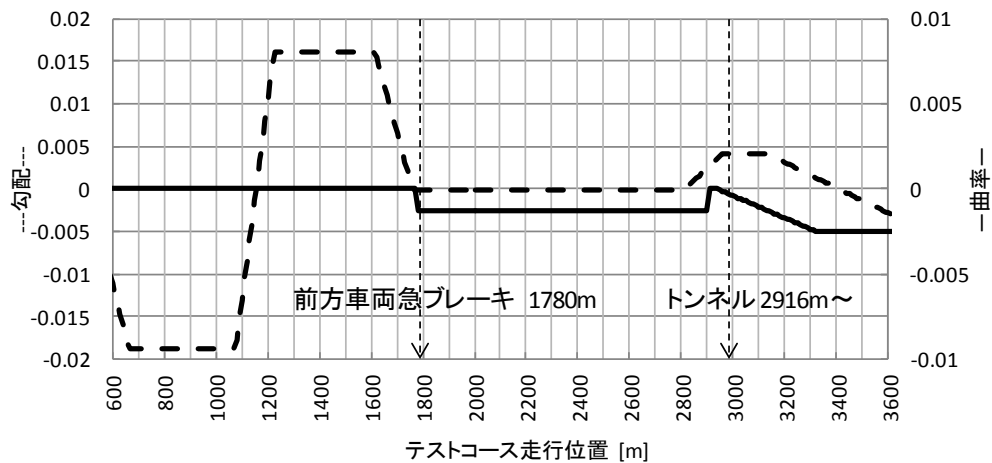


図 5.13 テストコースの道路線形図（再掲）

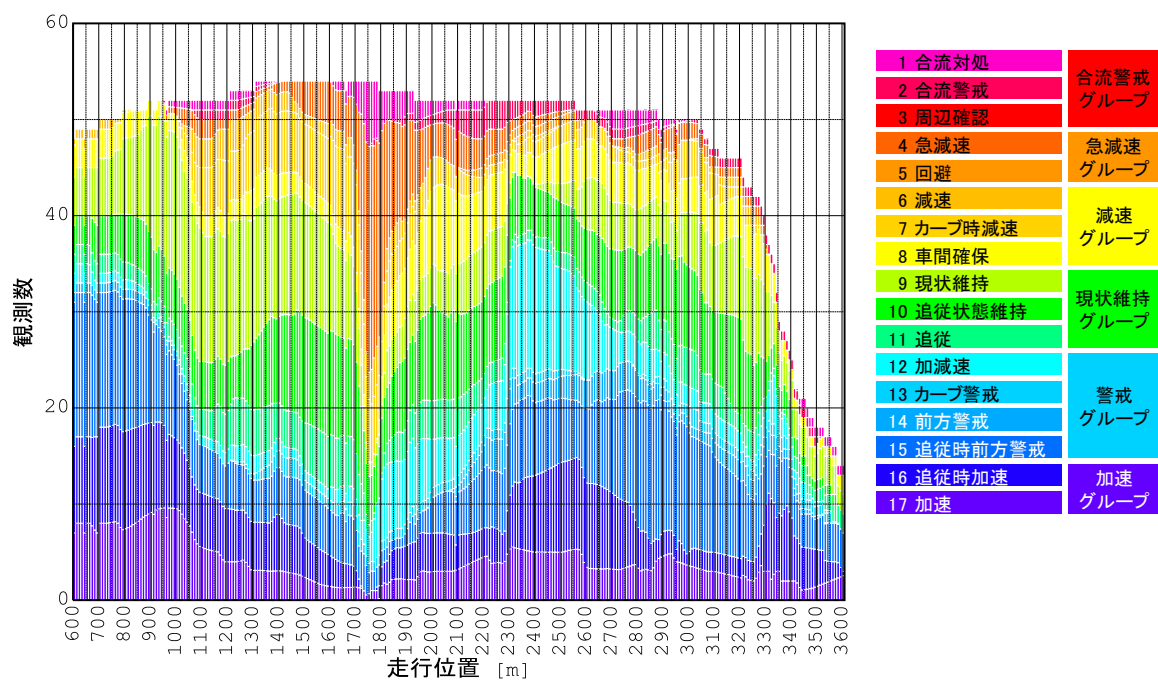


図 5.14 1 番目の走行実験における
テストコースの各走行位置における表明運転意図観測数

5.5.1.b. 淀川左岸線

次に、インタビュー2,3 番目の対象である、淀川左岸線走行時について触れる。なお、インタビュー4 番目も同一の淀川左岸線における走行であるが、インタビュー時間の都合上 1500m 以降の合流部前後の走行に対してのみインタビューを行っているため、本項では、インタビュー2,3 番目の淀川左岸線全域のインタビュー結果に対して考察を行う。図 5.15 に淀川左岸線の道路線形を再度示しておく。

淀川左岸線の約 1100m 以前は下り坂、約 950m～1600m は急な左カーブ、右カーブが続く S 字カーブとなっており、走行には注意を要する道路線形となっている。以降、図 5.16 に示す観測された表明運転意図の総数に基づいて、この S 字カーブに着目した考察を加える。

走行位置 950m～1300m の左カーブ、1300m～1600m の右カーブそれぞれに対応する区間において、「カーブ時減速」の観測数が増加していることが図 5.16 から読み取れる。ただし、線形の変化よりも約 100m 早く表明運転意図の変化がみられる。これは、線形の変化に対して、事前に対処しようという意図を持つ被験者が相対的に多いことを示唆している。また、「カーブ警戒」に関しても、総数が少ないが同一の傾向が読み取れる。「カーブ時減速」の観測数が増加する一方で、「追従」「現状維持」「加速」等であり、前方車両に追い付いて追従することを、多くの被験者があきらめ、カーブを安全に走行しようとしていたことが推察される。

合流地点前後では、合流警戒グループが増加しており、情報板や合流車両に対応して表明運転意図が変化したものと考えられる。この合流部の運転意図の推移については、第 6 章においては、合流部の運転支援情報の提供が運転意図の変化に及ぼす影響に着目し、より詳細な分析を行う。

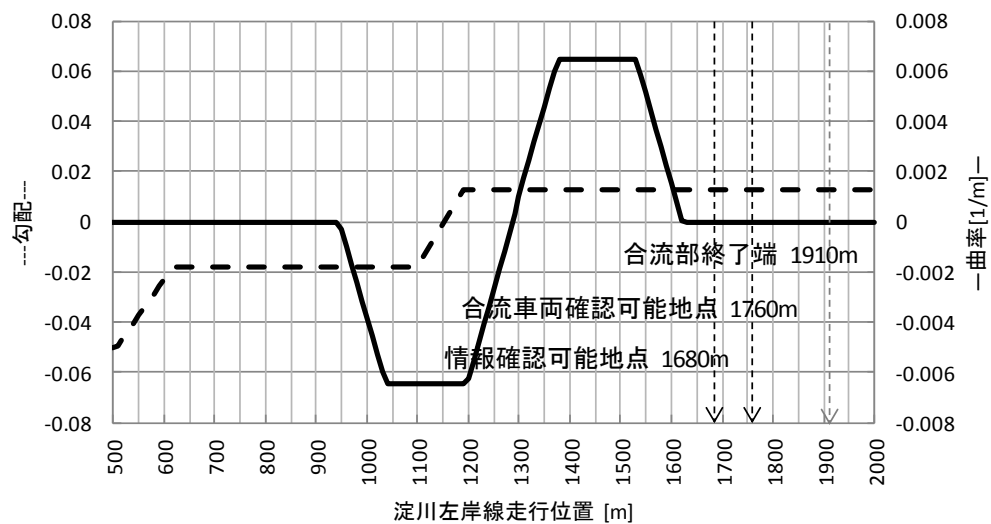


図 5.15 淀川左岸線道路線形図（再掲）

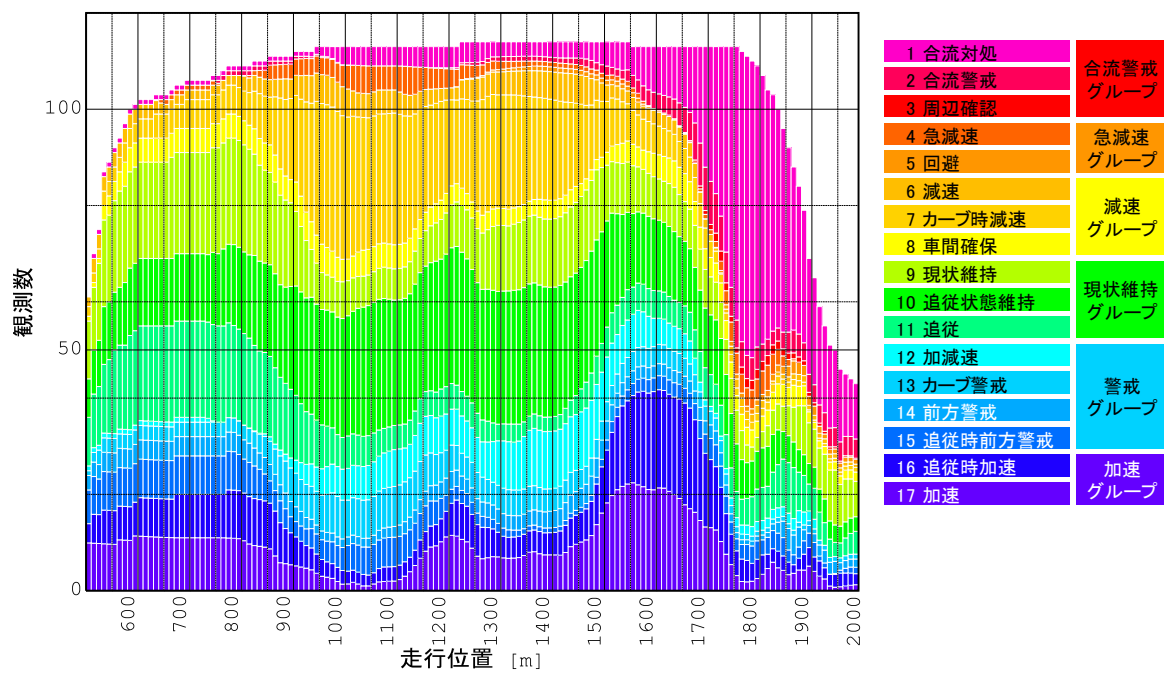


図 5.16 2,3 番目の走行実験における
淀川左岸線の各走行位置における表明運転意図観測数

5.5.1.c. 環状線

最後に、インタビュー5番目の対象である、環状線走行時について触れる。図 5.17 に環状線の道路線形を再度示す。図 5.18 には、観測された表明運転意図の総数を示す。淀川左岸線走行時同様、約 325m~425m の区間にカーブがあり、その約 100m 手前から「カーブ時減速」「カーブ警戒」の観測数が増加している。また、本走行では車線変更を許していたものの、カーブ区間では、車線変更禁止の表示があり、合流区間までは、ほとんどの被験者が車線変更をしていない。結果的に走行を開始した車線にとどまる被験者が多く、環状線に対して合流してくる守口線と直接隣り合う車線ではなく、その進行方向右隣の車線を走行したまま合流部に差し掛かる傾向が見受けられる。また、多くの被験者は早い段階において合流部を認識しており、合流に備える傾向が見られた。その結果として、カーブ区間では、「合流警戒」「周辺確認」といった合流を回避するための車線変更の準備段階を示すと考えられる運転意図ではなく、減速グループの速度調整によって合流に備える運転意図が多く観測されたといえる。

430m 以降は合流部となっており、「合流対処」「回避」の観測数が増加している。合流区間では、合流しさらに被験者車両の存在する車線に車線変更してくる車両を、避けるように車線変更を行う場合が多く観測されている。その時の運転意図をこの「合流対処」「回避」が表わしていると考えられる。

以上の表明運転意図と道路線形・周辺車両の挙動との比較に関する考察により、被験者は、道路線形や周辺車両の挙動が変化した場合に表明運転意図を大きく変化させていることがわかった。また、本インタビューの回答から得た表明運転意図の変化は、走行実験の設定において想定していたものが多く、インタビューによって表明運転意図を抽出するという手法が、実際のドライバーが持っていた運転意図を把握するうえで妥当であったといえる。

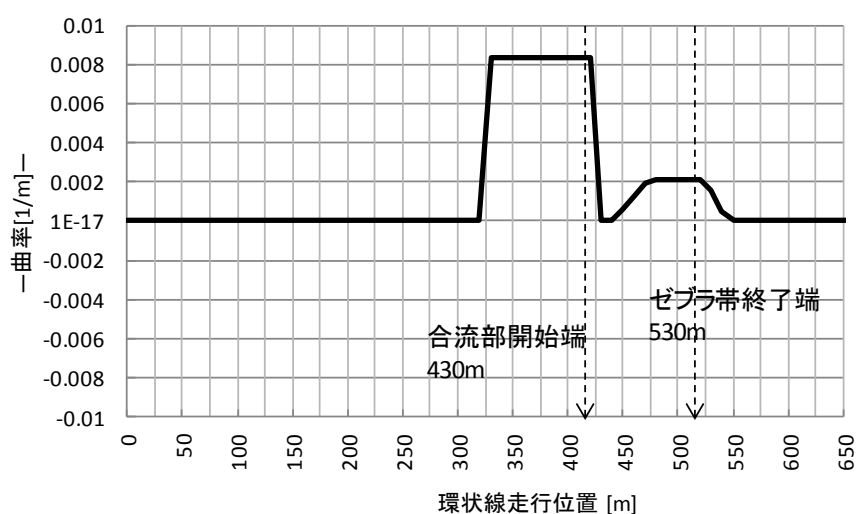


図 5.17 環状線道路線形図（再掲）

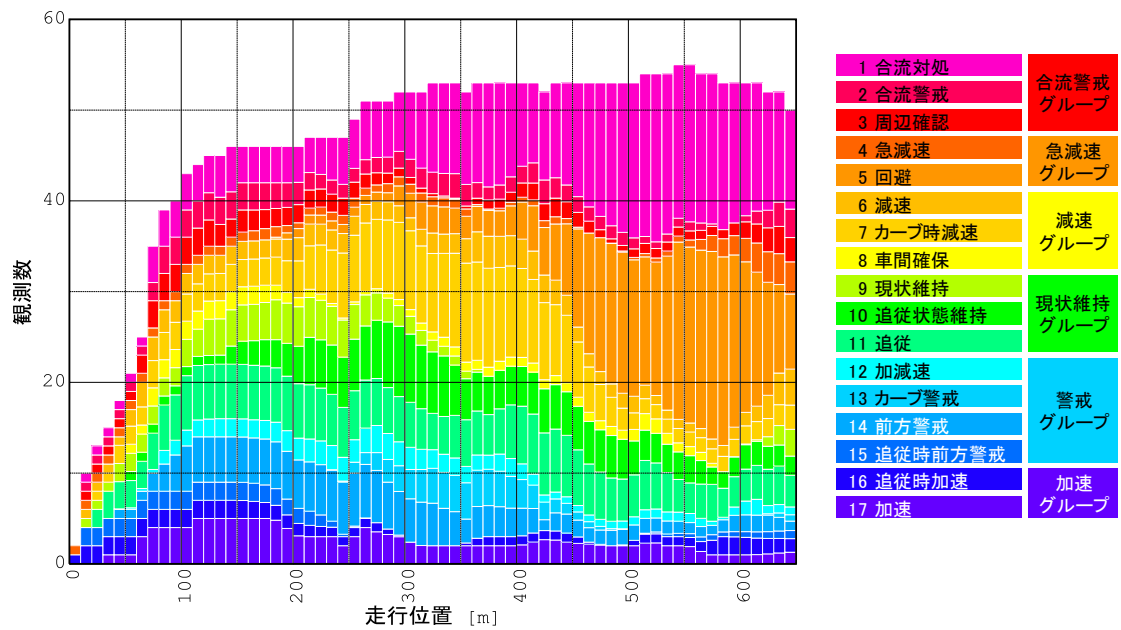


図 5.18 5 番目の走行実験における
環状線の各走行位置における表明運転意図観測数

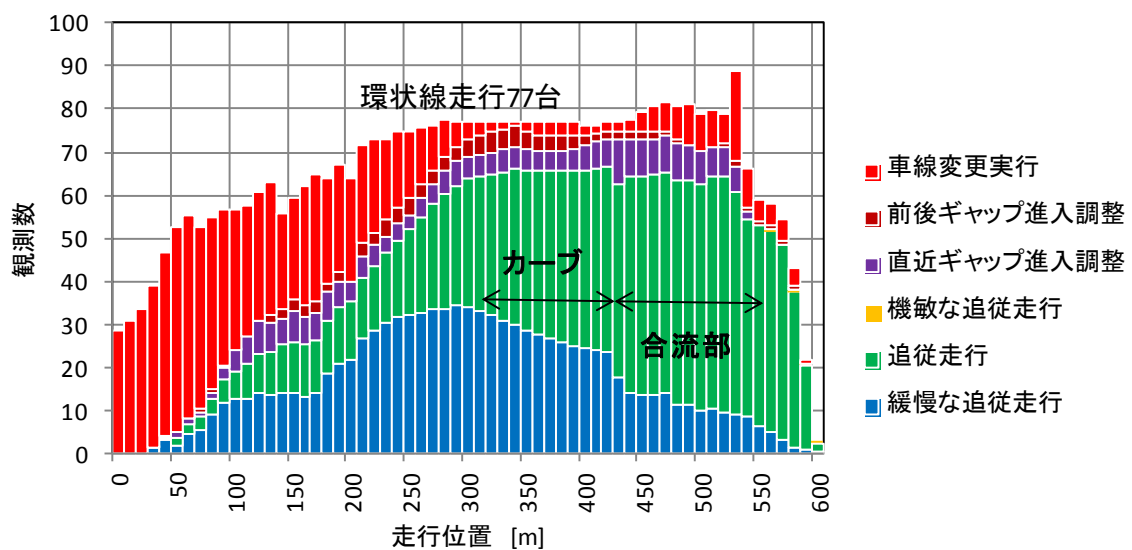


図 5.19 環状線の各走行位置における推定運転意図状態確率の合計
(第 4 章におけるモデルの推定結果)

また、図 5.19 には比較のため、第 4 章における運転意図推移統合型車両挙動モデルによる推定運転意図の総数の変化を再度示した。各推定運転意図と各表明運転意図の意味合いを考慮すると、車線変更実行は「合流対処」に、前後ギャップ選択と直近ギャップ選択は

その他の合流対処グループの表明運転意図に対応しているといえる。また、機敏な追従走行と追従走行は減速グループに、緩慢な追従走行はその他の現状維持グループ、警戒グループ、加速グループに近いと考えられる。その上で、推定運転意図と表明運転意図を比較すると、カーブ区間以降、推定運転意図である通常走行が減少する傾向と、現状維持グループ、警戒グループ、加速グループの表明運転意図が減少する傾向が類似していることがわかる。また、その他の推定運転意図、表明運転意図グループは共に増加傾向にあり、モデル推定結果に基づく推定運転意図は、実際の表明運転意図と大きく乖離していないと考えられる。

5.5.2. 表明運転意図観測数の年代別比較

全被験者の観測された各表明運転意図の総数についての考察を行ったが、どの走行実験のどの走行位置においても複数の表明運転意図が観測されており、被験者間での表明運転意図の違いも無視できない。高齢化の進む現代においては、高速道路を走行するドライバーの年齢層に対しても高齢化が進み、ドライバーの持つ運転意図の割合も異なっていくと考えられる。そのため、本項では、年齢で被験者を分類し、観測された表明運転意図の比較を行う。なお、比較の対象として、前方車両に得意な挙動を設定したテストコースを取り上げ、前方車両の挙動の変化に対する反応の違いに着目する。年齢による分類は、20代、30～50代、60～70代で分割した。

まず、図 5.20 に 20 代の被験者の観測された表明運転意図の総数の変化を示す。20 代の被験者は 1780m 地点で前方車両が急制動をかけた場合の「減速」への変化や、その後の前方車両が加速した場合の警戒グループ、加速グループへの変化、トンネル区間中間からの前方車両の加速に対する加速グループへの変化といった、表明運転意図の道路線形および前方車両の走行状況に応じた変化が顕著にみられる。一方で、図 5.21 に示す 30～50 代の被験者の表明運転意図の変化は 20 代と比較して緩慢である。また、全体的に 20 代よりも、30～50 代の被験者の方が前方車両が急制動をかけた後の、急減速グループ、減速グループの割合が多く、二度目の前方車両の急制動を警戒する被験者が多かったと考えられる。

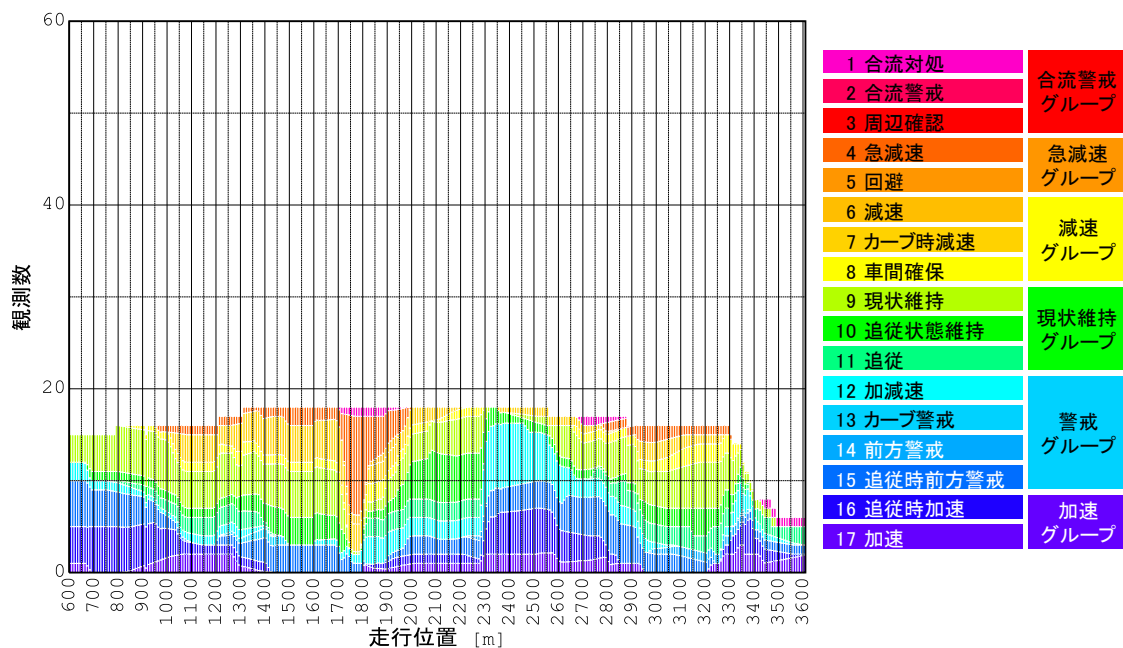


図 5.20 テストコースの各走行位置における表明運転意図観測数（20 代）

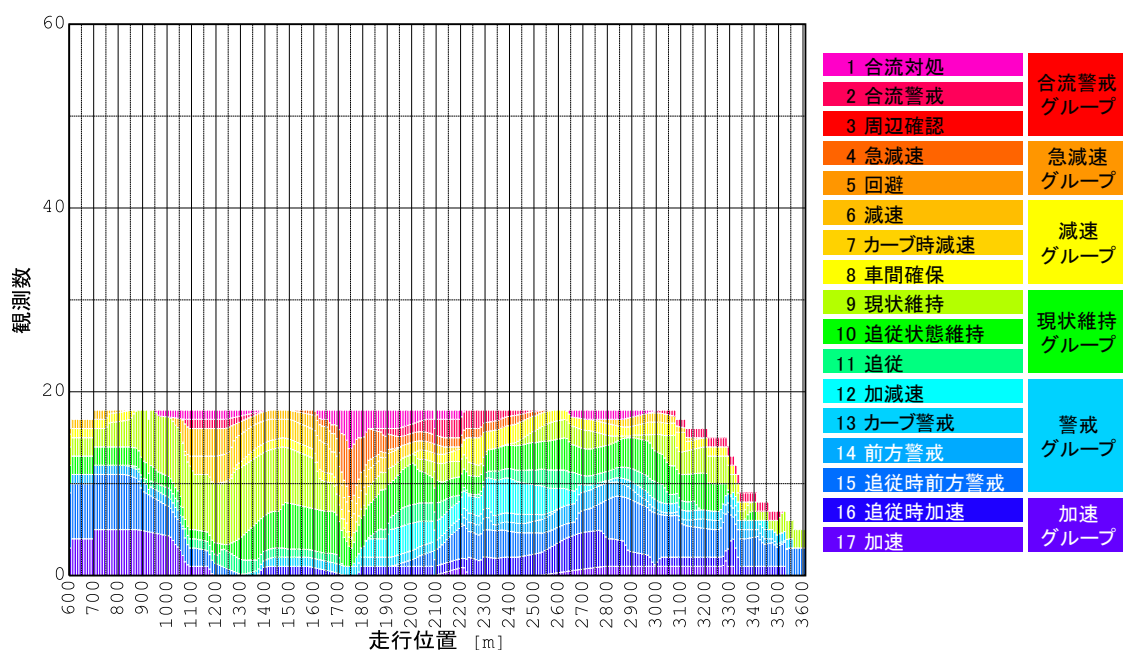


図 5.21 テストコースの各走行位置における表明運転意図観測数（30 代～50 代）

図 5.22 に示すように、60～70 代の被験者の約半数は前方車両が急制動をかけた後、「車間確保」へ変化している．この区間における「急減速」と「車間確保」の割合は、30～50 代の被験者よりもさらに多く、年齢が上がるに従って前方車両の急制動の経験が、後の走行に影響するようになっているといえる．また、60～70 代の被験者には、「加速グループ」

の表明運転意図が多いが、実際の走行では前方車両に追い付けない走行が多くみられ、運転意図と実際の走行が乖離している状態が多かったと考えられる。

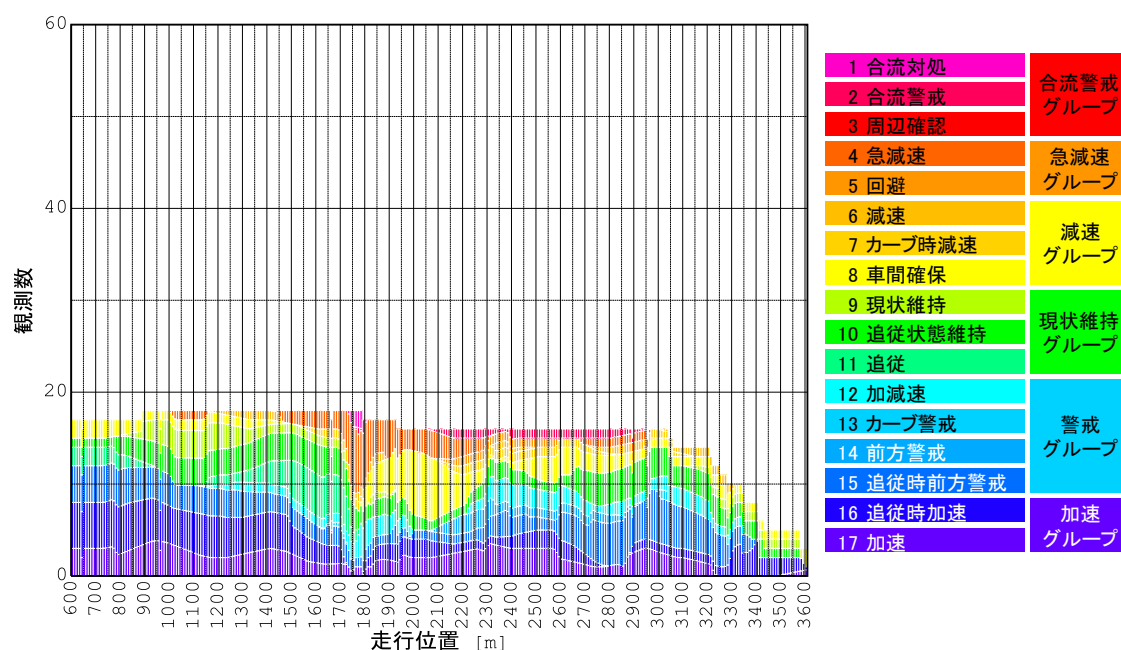


図 5.22 テストコースの各走行位置における表明運転意図観測数（60 代～70 代）

5.6. 表明運転意図と車両挙動との関係

本節では表明運転意図の違いによって、車両挙動が異なることを DS 実験から得られる車両挙動データを用いて示し、運転意図推移統合型車両挙動モデルにおける「異なる車両挙動様態は異なる運転意図によって導かれる」という仮定の裏付けを行う。

5.6.1. 表明運転意図と車両挙動に関する統計値との関係

5.6.1.a. 車両挙動統計値算出のための対象サンプル

本研究は、一般的な高速道路における走行を想定した車両挙動のみを対象としている。特に周囲の車両との相互関係に着目している。しかし、一部の高齢者に対して前方車両を無視した低速走行しているケースが存在する。よって、以後、表明運転意図と車両挙動との関係を分析するにあたり、特に上述のケースを除外し分析を行う。当該ケースは前方車両との相対距離が開きすぎており、追従していると言い難い状態と考えられる。本実験で取得した車両挙動は最速で 80km/h 程度の走行であり、その場合余裕を持って停止できる制動距離は 80m 前後となる。そのため、前方車両との相対距離が 90m 以内の状態では何らかの前方車両に対する反応があると考えられる。90m を閾値と仮定し、その値以内の状態が 10 秒以上連続している期間を分析対象とした。

各表明運転意図に対応する有効期間の総時間は、表 5.6 に示す通りとなり、各表明運転意図ごとの観測時間で見た場合、極端に割り当てられる時間が少なくなる表明運転意図は存在しないことが確認できる。

表 5.6 各表明運転意図に対応する有効期間の総時間

表明運転意図名		総走行時間 [sec]
合流警戒 グループ	1 合流対処	1050.2
	2 合流警戒	339.4
	3 周辺確認	86.2
急減速 グループ	4 急減速	780.0
	5 回避	174.4
減速 グループ	6 減速	390.0
	7 カーブ時減速	1537.4
	8 車間確保	961.2
現状維持 グループ	9 現状維持	2627.4
	10 追従状態維持	2569.2
	11 追従	2010.6
警戒 グループ	12 加減速	1185.2
	13 カーブ警戒	304.8
	14 前方警戒	336.0
	15 追従時前方警戒	1822.2
加速 グループ	16 追従時加速	1556.4
	17 加速	1354.8

5.6.1.b. 表明運転意図グループ間の比較

まず、表明運転意図と車両挙動との関係の、おおまかな傾向を把握するため、各表明運転意図グループに対応する車両挙動の統計値を比較する。ここで用いる指標は被験者車両の 1)速度、2)加速度、3)アクセル・ブレーキ指標に加え前方車両との 4)相対距離、5)相対速度の 5 種類とする。アクセル・ブレーキ指標であるが、基本的にアクセルペダルを被験者が少しでも踏んでいれば 1 より大きな値で完全に踏み込んだ状態が 2 (最大値)、同様にブレーキペダルを少しでも踏んでいれば -1 より小さな値で完全に踏み込んだ状態が -2 (最小値) となる指標である。ただし、本走行実験では、被験者のペダルの踏みかえの様子も記録しており、明らかにブレーキペダルに踏みかえていた場合で、ブレーキペダルが踏み込まれていない場合はアクセル・ブレーキ指標の値を -0.5 としている。また、前方車両との相対距離は道路に沿った座標をもとに算出した常に正の値をとる値であり、相対速度は前方車両の速度から被験者車両の速度を引いた値として定義している。そのため、相対速度が正の場合はその速度が維持されれば車間距離が拡大し、負の場合はその逆に車間距離が縮小する状況を示唆する。

上述した 5 つの指標の平均値と標準偏差について、各表明運転意図グループ間で比較する。なお、平均値と標準偏差は、DS の車両挙動から各指標を 0.2 秒ごとにサンプリングし

たものを用いて算出している. 運転意図グループ別に算出した 5 つの指標について, 図 5.23 は平均値を, 図 5.24 は標準偏差をそれぞれ示している.

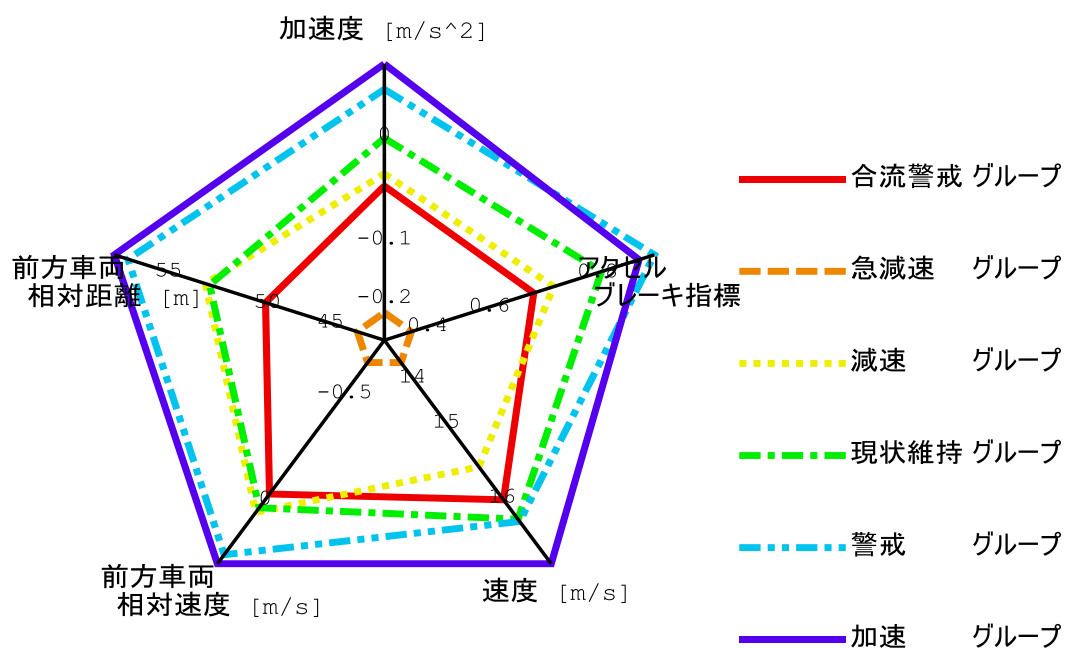


図 5.23 表明運転意図グループ別の各車両走行状況変数の平均値

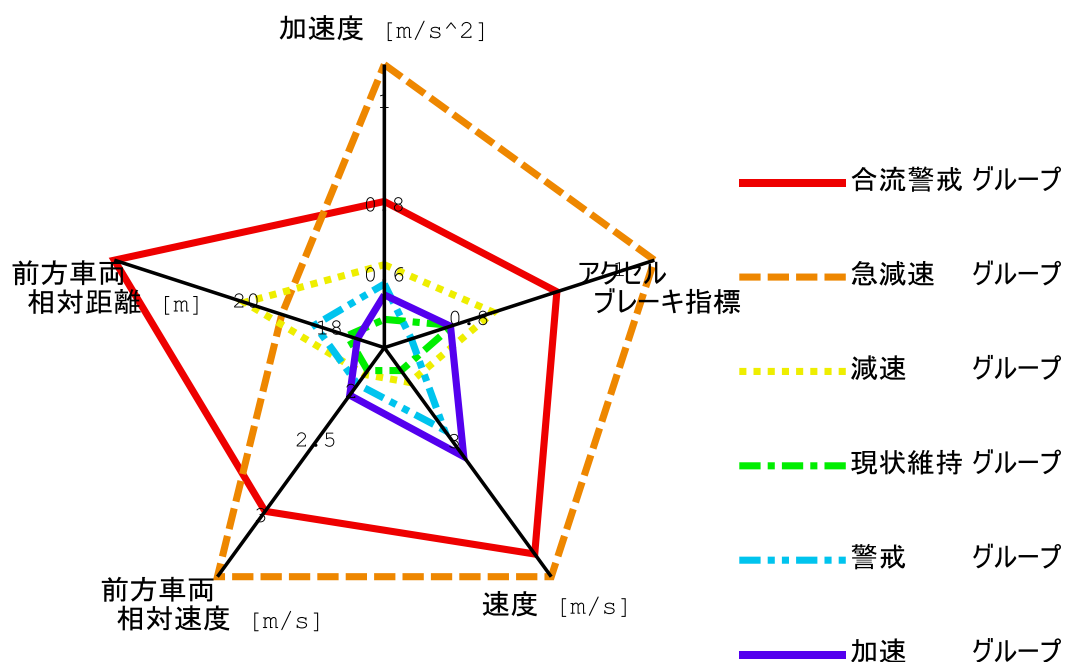


図 5.24 表明運転意図グループ別の各車両走行状況変数の標準偏差

図の軸はそれぞれ 6 つの表明運転意図の内、最大、最小の値ものを基準に、指標値の 2 乗に比例する距離に値を割り付けている。5 つの指標値の内、速度、加速度、アクセル・ブレーキ指標は値が大きいほど、加速傾向にあることを示し、相対距離、相対速度は値が大きいほど、前方車両との車間が拡大する傾向にあることを示す。図 5.23 に示す平均値を各運転意図グループ間で比較すると、ほとんどの指標が、加速グループ>警戒グループ>現状維持グループ>減速グループ>合流警戒グループ>急減速グループの順に値が大きい。これは、加速グループや警戒グループでは、車間が長く、その車間の縮小のために加速傾向にあることを示し、一方で、急減速グループでは短い車間を拡張するように、減速傾向にあることを示している。また、現状維持グループ、減速グループ、合流警戒グループの相対速度は平均値で見れば 0 であり、前方車両との位置関係を変化させる車両挙動が少ないことが推察される。ただし、図 5.24 より、合流警戒グループの相対速度の標準偏差をみると、現状維持グループや減速グループよりも大きく、相対距離の標準偏差も大きいため、合流警戒グループでは、ドライバーは前方車両との位置関係を考慮せず、合流警戒という名前の通り、前方車両ではなく、合流してくる車両を意識した走行である可能性が高い。なお、合流車両が完全に合流した時点以降、前方車両は合流してきた車両として処理しているが、当該時点において多くの被験者は既に追従するという意図を持っていたと考えられる。また、本走行実験には合流車両を被験者自身の車両の前方に進入させてあげようとする挙動が多くみられた。この時に、前方車両との相対距離は比較的大きくなり、同時に合流警戒グループの運転意図を被験者が持っていた場合が多かったことが示唆される。

合流警戒グループ、急減速グループの加速度、速度、相対速度の標準偏差が大きい理由は、前方車両の急接近に対して急減速をかけた結果、加速度や速度が大きな場面と、小さな場面が混在することになったためであると考えられる。

さらに、2 つの図からは現状維持グループの相対速度と加速度の平均値はほぼ 0 の値を示し、各指標の標準偏差が小さいことが読み取れる。このことから、現状維持という名前の通り、前方車両との位置関係や現状の速度を維持している車両挙動が現状維持グループに多く割り当てられているといえる。加えて、減速グループの各指標の平均と標準偏差の値は急減速グループと現状維持グループの中間の値を示し、警戒グループの値は加速グループの値をやや現状維持グループに近づけた値となっている。よって、減速グループ、警戒グループはそれぞれ、急減速グループと現状維持グループ、現状維持グループと加速グループの特徴を併せ持った挙動となっていると考えられる。

5.6.1.c. 表明運転意図グループ内の比較

既に述べた各運転意図グループの車両挙動の特徴に加えて、以降では前述の 17 の表明運転意図の特徴をそれぞれの運転意図グループ内で比較する。図 5.25 は各表明運転意図に対応する期間における車両挙動を表す各指標の平均値を太線で、20%ile, 80%ile 値を細線で示している。なお、各表明運転意図グループごとに図を分けているが、全ての図で軸のスケールリングは統一している。

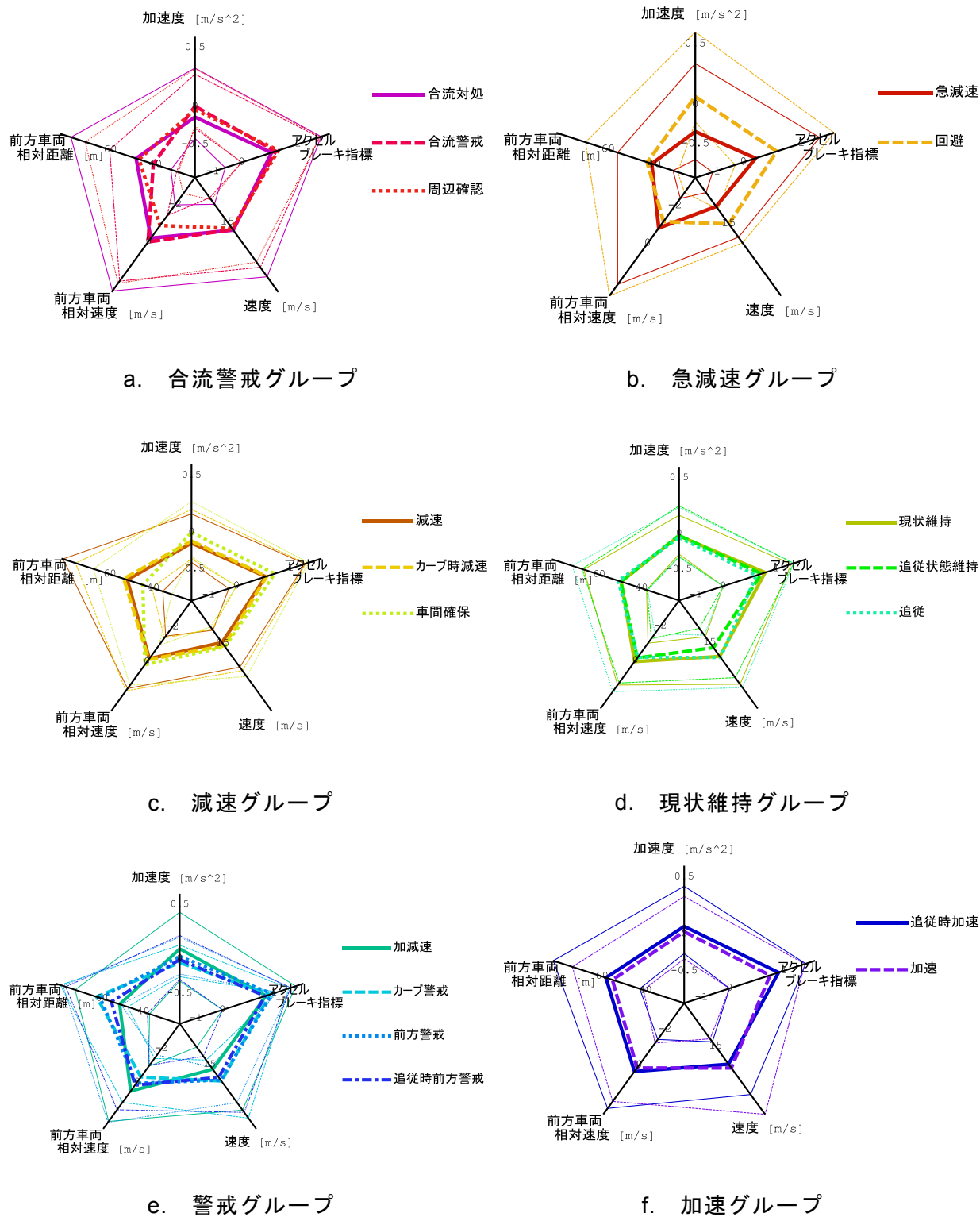


図 5.25 運転意図別の各車両走行状況変数の平均値と 20%ile, 80%ile 値

各表明運転意図グループを作成する際、各表明運転意図の 5 つの指標の平均値を参考にしていた。よって、図 5.25 で示したように、現状維持グループ、加速グループに属する各表明運転意図について、5 つの指標値はほぼ同一の傾向を示しており、その他の表明運転意図グループの指標値も類似している。しかし、各表明運転意図グループの中には少しづつ指標値に差があるものが存在する。

特に急減速グループの「急減速」と「回避」の加速度、アクセル・ブレーキ指標、速度は大きく異なっている。2 つの表明運転意図における前方車両との相対距離、相対速度の指標値は他の運転意図グループと比較して小さい値となる傾向にあると考えられる。特に、相対速度の平均値は、負値となっており前方車両との車間距離が縮小する傾向にあり、どちらも前方車両との位置関係を改善することが必要である状況を多く含んでいると考えられる。2 つの表明運転意図の違いは、その前方車両への対処方法にあると推察される。「回避」よりも「急減速」の方が加速度、アクセル・ブレーキ指標、速度が共に小さいため、「急減速」では、ブレーキによる減速によって前方車両との車間を広げようとしていると考えられる。一方で「回避」は運転意図名と、第 5.5.1 項において、環状線の合流部で「回避」が多く観測されたことを考慮すると、車線移動によって、前方車両との位置関係を改善しようとしていると推察される。

また、合流警戒グループ中の「合流警戒」、減速グループ中の「車間確保」では、他の同グループ内の表明運転意図と比較して、前方車両との相対距離が小さく、前方車両との位置関係をより意識すべき状況にあると考えられる。「車間確保」はその名の通り、車間を一定値以上にすべき状況にあると考えられる。他の合流警戒グループと減速グループ内の表明運転意図には、「周辺確認」や「カーブ時減速」等、ドライバーの意識の対象が、例えば道路線形や周辺車両など前方車両以外に向いていた可能性を示す名称の表明運転意図が含まれており、前方車両を意識する必要性が相対的に低い状況であったと考えられる。

警戒グループの中の各表明運転意図の統計値は現状維持グループに近いものと、加速グループに近いものが混在している。「加減速」に関しては、相対距離、速度の分布が現状維持に近く、それ以外は加速グループの指標値よりも大きい。「カーブ警戒」は相対距離が加速グループの指標値よりも大きく、それ以外の指標値は現状維持グループと同等であり、カーブに対応した走行を維持しているものと考えられる。また、「前方警戒」「追従時前方警戒」は現状維持グループと加速グループの中間の値を示す指標が多く、ドライバーは加速しようとしているが前方車両との関係も気にしているものと推察される。このように、現状維持グループと加速グループの間には、その中間の意図が多く存在しているものと考えられる。

以上のように、表明運転意図と車両挙動の間にはある種の関係性の存在を伺うことができ、想定している表明運転意図と車両挙動の間には整合性も認められることがわかる。また、第 5.5.1 項の分析結果同様、各表明運転意図の名前と車両挙動に矛盾がないことが示

唆された。

5.6.2. 表明運転意図と加速度との関係

第3章、第4章で説明した通りに、各表明運転意図に対応する加速度モデルが異なるという仮定のもと、本研究の運転意図推移統合型車両挙動モデルは構築されている。本項では、上記の仮定の妥当性を検討するため、加速度モデルの説明変数として用いる被験者車両の速度、前方車両との相対速度および、相対距離に着目し、加速度モデルの被説明変数である加速度との相関を算出し、各表明運転意図の間で比較する。その上で各表明運転意図に対して別々の加速度モデルを当てはめることの妥当性を示す。

まず、加速度モデルにおいて有効な説明変数となる可能性の高い相対速度に着目し、加速度の感度について、表明運転意図グループ内で最も顕著な差がみられた急減速グループのデータをプロットしてみる。図5.26に「急減速」と「回避」に対応する期間の加速度と相対速度の散布図を示す。なお、プロット数を絞るため、20秒間毎のサンプルで図を作成している。図より、明らかに、「急減速」の方が加速度と前方車両の相対速度との間に高い相関があることがわかる。「回避」は前方車両を車線変更によって避けようとする意図であり、「急減速」の方が前方車両を意識していることが加速度への感度からも示すことができたといえる。

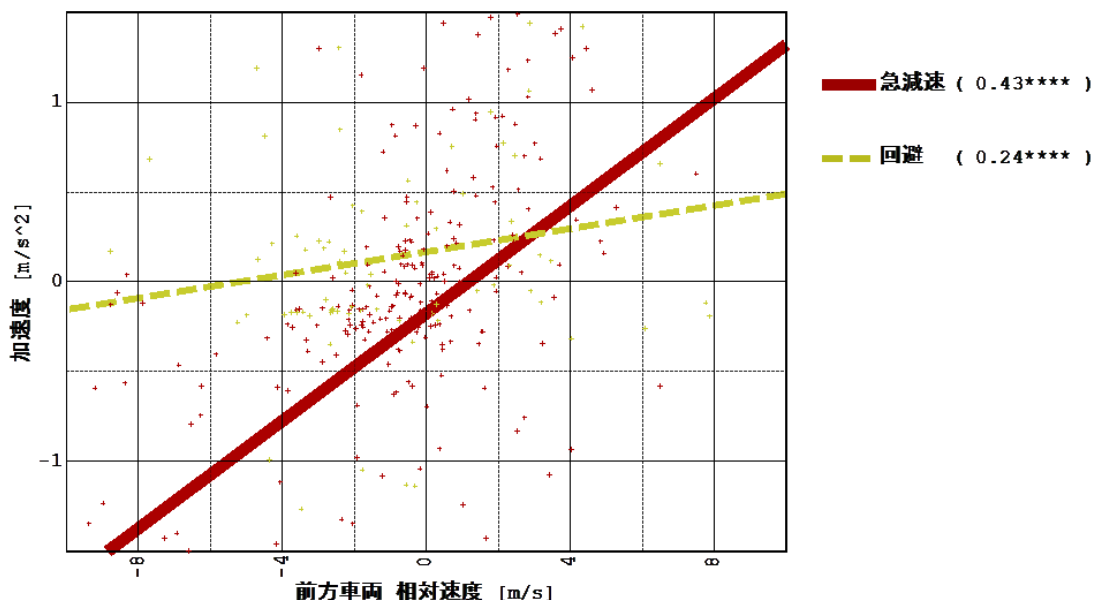


図 5.26 各表明運転意図の相対速度と加速度との関係（急減速グループ）

加速度と各被説明変数との間の相関係数を表明運転意図グループ別に算出した値を表5.7に示す。なお、表中の相関係数は0.2秒ごとに計測したサンプルに基づいて算出しており、相関係数のt検定結果も併せて示している。

表 5.7 表明運転意図グループ別に見た 加速度と各指標との相関

表明運転意図	加速度との相関とそのt検定結果			判例	正の相関	負の相関
	速度	相対速度	相対距離			
1 合流警戒 グループ	0.04 +++++	0.17 +++++	0.04 +++++	片側 10%有意	+	-
2 急減速 グループ	-0.05 ----	0.34 +++++	0.16 +++++	片側 5%有意	++	---
3 減速 グループ	-0.07 ----	0.29 +++++	0.07 +++++	片側 1%有意	+++	----
4 現状維持 グループ	-0.01	0.24 +++++	0.10 +++++	片側 0.1%有意	++++	----
5 警戒 グループ	-0.06 ----	0.29 +++++	0.09 +++++			
6 加速 グループ	-0.05 ----	0.28 +++++	0.12 +++++			

すべての表明運転意図グループについて、前方車両との相対速度・相対距離と、加速度との関係について正の相関がみられる。この正の相関は、前方車両が遠ざかる傾向にある場合に加速度が高くなり、反対に前方車両が近づく傾向にある場合に減速する傾向を示している。その中でも、前方車両との相対値との相関は急減速グループが特に高く、合流警戒グループが小さいことがわかる。これは、第 5.5.2 項における分析結果同様、急減速グループでは前方車両の挙動に敏感に反応して、速度を制御する必要があることと関係している。一方で、合流警戒グループでは前方車両との相対的な関係が車両挙動に及ぼす影響は相対的に小さい状況で、主として合流車両に対処していた可能性を示唆する結果である。

また、現状維持グループにおける速度と加速度との相関がみられない。これは、現状を維持しようとした場合、ドライバーは自車の速度を意識しない可能性があることを示唆しているといえる。さらに、合流警戒グループの速度と加速度との間には、他の表明運転意図グループと異なり、正の相関がみられる。通常の走行であれば速度が低い場合は加速し、速度が高い場合は減速するという負の相関がみられるが、合流警戒グループではその反対の傾向を示している。おそらく、合流部において被験者の車両の側方に合流車両が存在する場合、被験者車両の速度が高い場合は加速して合流者を回避し、被験者車両の速度が低い場合は減速して前方に合流車両を入れようとする傾向が反映されている可能性が高いと推察される。

表 5.8 では各表明運転意図の加速度と各被説明変数との間の相関係数について示している。表明運転意図グループを各表明運転意図に分けると、一般的な傾向を示さない、すなわち速度に対しては負、相対距離に対しては正の相関を示さない表明運転意図が明らかになる。以下に一般的な傾向を示さない表明運転意図を相関係数の値に基づいて分類しつつ述べる。

表 5.8 表明運転意図別に見た 加速度と各指標との相関

表明運転意図名		加速度との相関とそのt検定結果		
		速度	相対速度	相対距離
合流警戒グループ	1 合流対処	0.03 +++	0.19 +++++	0.01
	2 合流警戒	-0.03 --	0.26 +++++	0.27 +++++
	3 周辺確認	0.01	0.35 +++++	-0.12 ----
急減速グループ	4 急減速	-0.08 ----	0.42 +++++	0.19 +++++
	5 回避	0.00	0.10 +++++	0.11 +++++
減速グループ	6 減速	-0.01	0.25 +++++	0.18 +++++
	7 カーブ時減速	-0.05 ----	0.33 +++++	0.13 +++++
	8 車間確保	-0.13 ----	0.24 +++++	-0.01
現状維持グループ	9 現状維持	-0.05 ----	0.26 +++++	0.06 +++++
	10 追従状態維持	-0.02 --	0.30 +++++	0.11 +++++
	11 追従	0.00	0.18 +++++	0.12 +++++
警戒グループ	12 加減速	-0.12 ----	0.33 +++++	0.05 +++++
	13 カーブ警戒	0.06 +++	0.10 +++++	0.05 ++
	14 前方警戒	-0.07 ----	0.18 +++++	0.16 +++++
	15 追従時前方警戒	0.01	0.27 +++++	0.15 +++++
加速グループ	16 追従時加速	-0.10 ----	0.34 +++++	0.12 +++++
	17 加速	-0.04 ----	0.21 +++++	0.10 +++++

a) 「合流対処」は速度と弱い正の相関を有しており、相対距離との相関がない。合流警戒グループの中でもとりわけ、「合流対処」が合流車両の回避に際して自車の速度に応じて加減速する傾向があると考えられる。また、「カーブ警戒」に関しても、速度との相関が正であり、相対速度、相対距離との相関が弱い。よって、この「カーブ警戒」では、前方車両や自分の車両の速度以外の道路線形等の要因に基づいて速度制御を行っている可能性が高い。

b) 「周辺確認」における加速度と相対距離との間には負の相関がみられる一方、相対速度との間には正の強い相関があり、特殊な速度調整方針を持っていると考えられる。

c) 「合流警戒」「周辺確認」「回避」「減速」といった安全を意識した場合の一部で、加速度と速度の間の相関が弱い。前方車両以外の要素に関わる表明運転意図にみられる傾向であることから、このことは、安全を意識した場合に自分の車両の速度を減速させるだけでは対処しきれない場面が存在したことを示しているものと考えられる。

d) 「追従状態維持」「追従」「追従時前方警戒」といった追従を意識した場合の一部でも加速度と速度の間の相関が弱い。これは、追従時には自分の車両の速度を意識しなくなることを示唆する結果である。

以上の考察より、一般的な傾向を示す表明運転意図と上述した a)～d)の表明運転意図のように、各説明変数の加速度への感度のパターンは、明らかに異なる5種類に大別できることが分かる。さらに、各表明運転意図間でも細かな差異が存在しており、表明運転意図が異なれば、加速度への各説明変数の感度も異なり、異なる加速度制御がみられる表明運

転意図同士が存在することがわかる．この結果は，異なる運転意図に対して，異なる加速度モデルを当てはめることの妥当性を示すものである．

5.7. 表明運転意図の推移

第3章, 第4章で説明した運転意図推移統合型車両挙動モデルでは, 運転意図が時々刻々推移すると仮定し, その推移確率を算出することによって, 運転意図の推移を表現するとともに, 車両挙度のモデルとしての説明力を高めようとしている．その推移の方向はモデル中の運転意図の推移構造によって定義されるが, 本研究では, 人が同時に考慮できる選択枝数を考慮して, 推移経路数を限定したモデルの構築を行った．これは, 特定の運転意図間の推移のみが存在することを仮定するものである．

本節では, 実際の表明運転意図の推移に関して, 特定の推移のみが認められるか否かという点に着目しつつ, 推移の構造について言及する．

表 5.9 は, すべての観測された表明運転意図の推移を表明運転意図グループ単位で集計したものである．なお, 対角線上の, 同一の表明運転意図グループ内での推移は, 同一の表明運転意図グループ内の他の表明運転意図へ推移した数を表しており, 推移が無いという意味とは異なる点に留意いただきたい．

表 5.9 表明運転意図の推移数

推移元 \ 推移先	合流警戒 グループ	急減速 グループ	減速 グループ	現状維持 グループ	警戒 グループ	加速 グループ
1 合流警戒 グループ	18	9	8	35	10	10
2 急減速 グループ	11	3	8	17	7	5
3 減速 グループ	10	7	13	33	22	15
4 現状維持 グループ	34	22	41	24	28	27
5 警戒 グループ	14	3	13	30	14	9
6 加速 グループ	8	2	18	33	6	2

全体の 2%以上で斜体, 4%以上で太字, 各グループ内での運転意図の変化も考慮

表 5.9 より, 現状維持グループと他の表明運転意図グループとの間の推移が多くみられることがわかる．また, 減速グループと警戒グループ, 減速グループと加速グループ間の推移も多い．これは図 5.27 に示すような現状維持グループを中心とした運転意図の推移構造を示唆している．

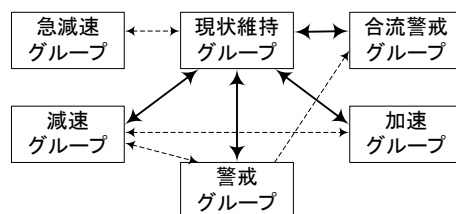


図 5.27 運転意図推移構造（実線：全体の 4%以上，破線：2%以上）

次に，特定の状況下における運転意図の推移構造についての考察を加える．表 5.10，表 5.11 は，表 5.9 に示した表明運転意図間の推移数から，それぞれ，テストコース走行時，淀川左岸線走行時の推移数のみを抽出した結果を示す．ともに，急減速グループと現状維持グループ間の推移数の割合が減少していることがわかる．また，合流警戒グループと現状維持グループ間の推移数の割合は，テストコース走行時に減少し，淀川左岸線走行時には区間内に合流部を含むことも影響したため，増加の傾向にあると考えられる．このように，特定の状況下における運転意図の推移構造はさらに限定的なものになることが示唆される．

表 5.10 テストコース走行における表明運転意図の推移数

推移元 \ 推移先	合流警戒グループ	急減速グループ	減速グループ	現状維持グループ	警戒グループ	加速グループ
1 合流警戒グループ	0	1	1	7	2	2
2 急減速グループ	1	0	4	5	4	3
3 減速グループ	3	4	10	13	15	4
4 現状維持グループ	5	9	15	4	17	12
5 警戒グループ	1	3	8	19	8	5
6 加速グループ	1	1	9	15	4	0

全体の 2%以上で斜体，4%以上で太字，各グループ内での運転意図の変化も考慮

表 5.11 淀川左岸線走行における表明運転意図の推移数

推移元 \ 推移先	合流警戒グループ	急減速グループ	減速グループ	現状維持グループ	警戒グループ	加速グループ
1 合流警戒グループ	10	1	5	23	5	5
2 急減速グループ	1	0	1	5	0	1
3 減速グループ	6	3	3	14	7	10
4 現状維持グループ	26	6	22	17	10	15
5 警戒グループ	11	0	5	7	6	4
6 加速グループ	7	0	8	16	2	2

全体の 2%以上で斜体，4%以上で太字，各グループ内での運転意図の変化も考慮

一方で、表 5.12 に示す環状線走行時の表明運転意図推移数をみると、合流警戒グループと現状維持グループ間、急減速グループと現状維持グループ間の推移数が多く、状況が異なれば、推移構造の一部が変化することがわかる。ただし、表 5.10～表 5.12 に挙げた、いづれの走行実験区間においても、現状維持グループを中心とした表明運転意図の推移が顕著であり、その区間の違いにより現状維持グループからの推移の選択肢数が制限されるような構造となっている。ドライバーにとって一度に多くの選択肢を考慮することは困難であり、負担が大きいと考えられることを考慮すると、上述した結果は、常のドライバーは全ての運転意図に対応する選択肢について考慮しているわけではないと考えられる。また、この結果は、第 3 章で示した通常走行を中心とする運転意図の推移構造と類似しており、第 3 章における運転意図の推移構造の仮定が妥当であることを示す結果であるといえる。

表 5.12 環状線走行における表明運転意図の推移数

推移元 \ 推移先	合流警戒 グループ	急減速 グループ	減速 グループ	現状維持 グループ	警戒 グループ	加速 グループ
1 合流警戒 グループ	8	7	2	5	3	3
2 急減速 グループ	9	3	3	7	3	1
3 減速 グループ	1	0	0	6	0	1
4 現状維持 グループ	3	7	4	3	1	0
5 警戒 グループ	2	0	0	4	0	0
6 加速 グループ	0	1	1	2	0	0

全体の 2%以上で斜体、4%以上で太字、各グループ内での運転意図の変化も考慮

5.8. まとめ

本章では、運転意図推移統合型車両挙動モデルで表現する際に前提としている、複数の異なる運転意図それぞれに対応した車両挙動の様相は異なったものとなるという仮定を検証するため、DS 実験をによる仮想の運転行動ではあるが、被験者の実際の運転意図データの取得方法論を構築し、取得した運転意図に関わるインタビュー結果を中心に、車両挙動データもあわせて用いて分析した。データは DS 実験とその後の被験者へのインタビュー調査によって取得した。この半構造化インタビュー形式から得られた回答は多くの情報を含んでいたため、クラスタリング分析を取り入れた手法によって、時々刻々のドライバーの様々な思考を複数の表明運転意図として集約し、統計的な分析を行った。以下に本章で得られた知見についてまとめる。

1) インタビュー回答をもとに命名した表明運転意図の名前が意味する走行と、実際の状況とが乖離していないことを確認し、実際の運転意図の把握方法として本章における手法が妥当であることを示した。

2) 得られた表明運転意図は、対応する車両挙動を示す指標の平均値等と運転意図の内容が類似している 6 つのグループに大別できた。

3) 車両挙動を示す指標の加速度への感度のパターンは5つに大別できた。

4) 車両挙動を示す指標の平均値等と加速度への感度に関して、表明運転意図間での違いを示から運転意図に対応した複数の加速度モデルで一連の車両挙動を表現すべきであることが示された。この結果は、複数の異なる運転意図それぞれに対応した車両挙動の様相は異なったものとなるという運転意図推移統合型車両挙動モデルの仮定を支持する結果である。

5) 現状を維持することを示す表明運転意図を中心とした表明運転意図間の推移構造がみられることを明らかにし、第3章で仮定した運転意図推移統合型車両挙動モデルの運転意図推移構造が実際の推移構造と乖離していないことを示した。

6) 一部の運転意図推移が顕著にみられるという結果から、運転意図推移統合型車両挙動モデルに運転意図の“推移”という構造を導入することの妥当性が示唆された。

ただし、複数の表明運転意図の中の一部の表明運転意図同士はほぼ同じ統計値を示すという結果も得られている。今回は、ドライバーの思考を17の表明運転意図に分離したが、多様な被験者を対象としていたため、本来ほとんど同じ運転意図を持っていたとしても、被験者ごとにインタビューへの回答が異なり、異なる表明運転意図として抽出された可能性が示唆された。また、今回行った走行実験は類似した走行挙動が多く、実際の道路上では、より多岐にわたった運転意図がみられると考えられる。特に自由な車線変更を許容した走行を本実験では十分行うことができなかった。そのため、車線変更に関する表明運転意図とその推移について未だ十分な知見が得られたとは言い難い。車線変更に関わる運転意図とその推移、そして、車両挙動との関係に関しての知見を得ることが今後の課題である。

本章における結果を踏まえると、ドライバーの持つ運転意図と交通事故の発生に関する関係性を定量的に評価可能な枠組みが構築されることが期待される。例えば、前方車両に追突してしまう危険性が高い状況のもとであるにも関わらず、加速しようとする運転意図をドライバーが持っている状況や、その時に、減速しようとする運転意図へ推移するよう促した状況を想定したの分析を考えてみる。上述の枠組みは、周囲の車両等の状況に加えて、明示的にドライバーの持つ運転意図を入力として与えた場合、出力として、対象としている車両挙動を得る。その出力から、どの程度の安全性が確保できているのかを評価することができると考えられる。すなわち、ドライバーに対して「危険である」等のメッセージを出すことによって、運転意図に対して変化を加えるような安全対策に関して、どの程度の運転意図の変化が生じる対策すれば、安全な挙動となる可能性が十分に高まるかという問題について考えることが可能になると考えられる。その第一歩として、次章では、運転意図と安全性について、表明運転意図を応用した分析を展開し、運転意図が安全性評価に応用できる可能性について言及する。

参考文献

- [71] 阿部喜, 宮武秀樹, 小栗宏次: 心拍変動を用いた運転行動モデルの切換による運転行動予測, 電気情報通信学会論文誌, Vol.J91-A, No.1, pp.78-96, 2008.
- [72] 片桐正明, 伊藤誠, 稲垣敏之: ドライバの視行動解析に基づく一般道走行時の車線変更意図の検出, Risk engineering : bulletin of department of risk engineering, pp.203-209, 2012.
- [73] 飯田克弘, 池田武司, 河井健, 森康男, 山岸将人: プロトコル法を用いた運転者挙動分析結果に基づくサグ部の道路構造改善方針の検討, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.5, pp.919-926, 2001.
- [74] 吉川聡一, 高木修, 'プロトコル法による運転行動の意思決定過程の研究', 社会心理学研究, Vol.14, No.1, pp.31-42, 1998.

6. 運転意図の推移に基づく情報提供効果分析

6.1. はじめに

本章では、運転意図と運転意図推移統合型車両挙動モデルを用いた安全性評価手法を適用した例として、第5章において取得した表明運転意図を活用した ON ランプ合流部における情報提供効果の分析を行う。第6.3節、第6.4節では、情報提供と表明運転意図、表明運転意図と安全性の関係をそれぞれ分割して分析することで、表明運転意図を明示的に導入する。その上で、表明運転意図を導入する意義について言及する。また、第6.5節において、情報提供効果を考慮した運転意図推移統合型車両挙動モデルのモデルパラメータ推定を行い、運転意図を考慮した情報提供効果の分析への当該モデルの活用方法を示す。

6.2. 情報提供下における表明運転意図推移の把握方法

本章における安全性評価の対象は、阪神高速2号淀川左岸線の正蓮寺 ON ランプ合流部における、本線走行車両への合流部における運転支援情報提供である。第5章において、当該合流区間の前後を模した道路を被験者が走行する DS 走行実験を行い、その後の半構造化インタビュー調査によって、走行時の表明運転意図の把握する手法について説明した。この表明運転意図を用いた安全性評価を本章において試みる。

本章では、情報提供効果に着目するため、次節以降は図6.1に示すように、実験走行中盤の S 字カーブを脱した 1600m 地点から、合流車両が被験者車両の存在する車線に移動し始める 1850m 地点までを、合流区間と呼び、分析の対象としている。その中でも、1680m 地点から 1760m 地点までの情報板の点灯が確認できる区間を情報提供区間と呼ぶ。

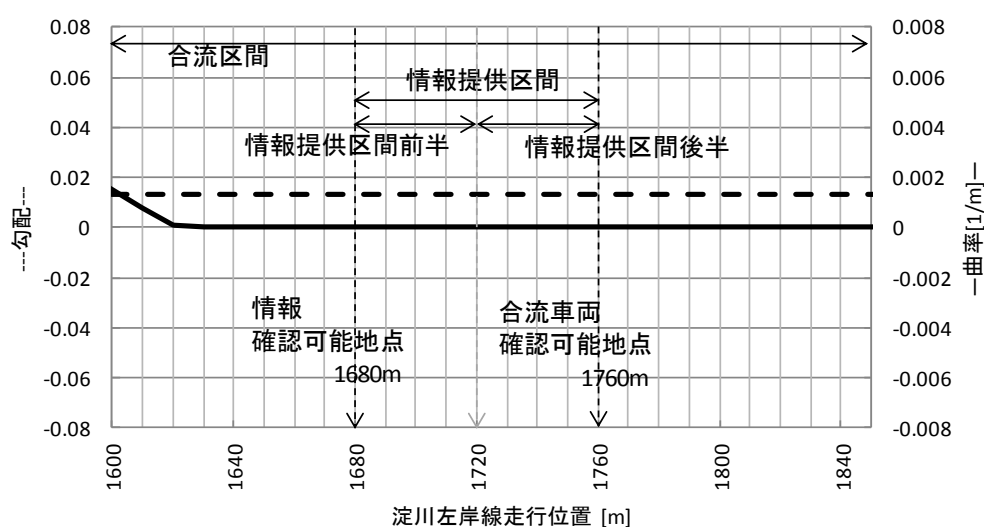


図 6.1 分析対象区間の道路線形図

さらに、本章における分析に対しても、第5章同様に情報提供効果を統一的な条件のもとで比較するため、前方車両との距離が開きすぎている状態にある走行を基本的に分析から除外する。具体的には、前方車両との相対距離が90m以内の状態が分析に耐えうる10秒以上連続した期間を分析対象とする。

図6.2、図6.3はそれぞれ、第5章において詳述したデータクリーニングを行う前と後の表明意運転意図の観測数である。データクリーニングは前方車両との距離が90m以内の状態が10秒以上連続した区間を抽出することによって行っている。なお、インタビューの区間を合わせるため1,2回目のインタビューに対応する表明意運転意図のみを図示している。図6.2と図6.3より、分析対象の合流区間におけるサンプル数に関して、データクリーニング後は、元のサンプル数の約半数以下となっていることが分かる。合流区間では前方車両を徐々に加速させる設定としているため、その前方車両に追いつけていない被験者が多数存在していることがサンプル数減少の理由である。しかし、極端に少ないサンプル数ではなく、統一的な分析条件を考慮し、データクリーニング後のサンプルを用いて分析を行う。図6.4と図6.5には、それぞれ、データクリーニングを行う前と後の各表明意運転意図の観測数を割合で示している。2つの図を比較すると、データクリーニング後の合流区間において、前方車両との車間が開きすぎて追いつこうとする「追従時加速」「加速」の割合が減少しており、「追従状態維持」「合流対処」の割合が増加している。図6.6に、データクリーニング前後の観測数の割合の差を表明意運転意図別に示した。上述した一部の運転意図以外に関しては各表明運転意図のデータクリーニング前後における観測数の割合の差は5%以内に収まっており、上述した運転意図に関しても20%以上の差はない。よって、データクリーニングによって偏った傾向にあるサンプルを抽出してはいないことが確認できる。また、図6.7には、分析対象区間を含む淀川左岸線全域の道路線形図を再度掲示しておく。図6.6と合わせて見ると、データクリーニング後の「合流対処」の割合が増加しているのは、合流車両が視認できる位置よりも下流であり、より上流の情報提供のある区間では「合流対処」の割合はデータクリーニング前後でほぼ同一であることが確認できる。よって、減少した「追従時加速」「加速」と、その分増加している「追従状態維持」の割合に触れなければ、データクリーニング後のサンプルを用いた情報提供効果を分析結果にデータクリーニングによるバイアスがかからないといえる。

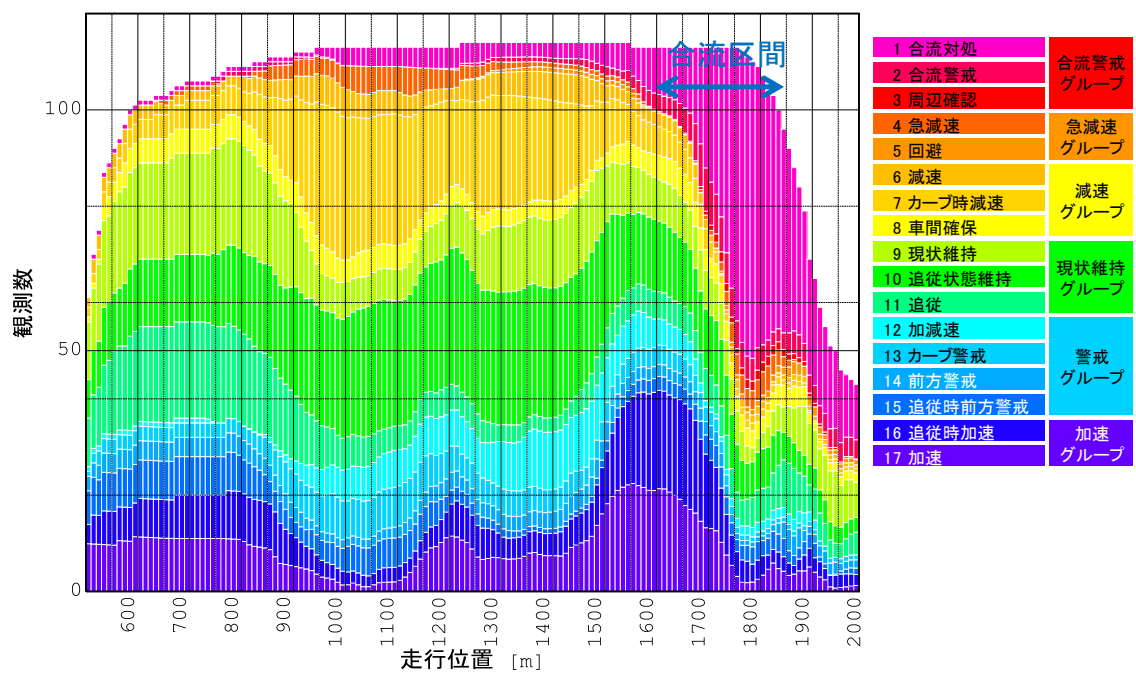


図 6.2 各走行位置における表明意運転意図観測数
(データクリーニング前)

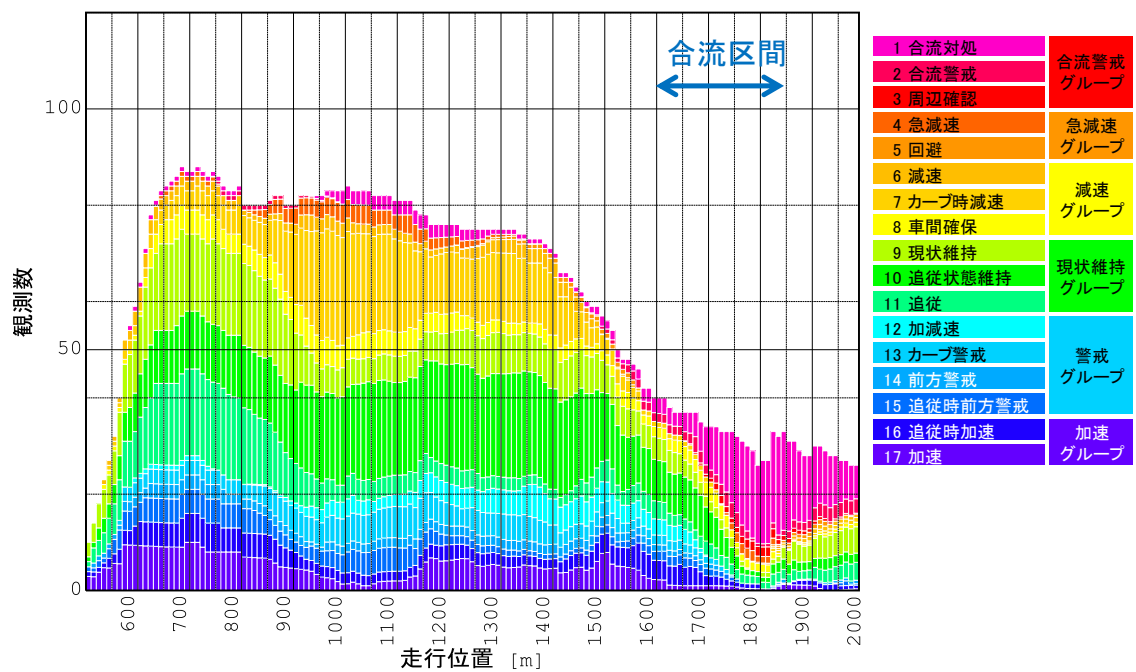


図 6.3 各走行位置における表明意運転意図観測数
(データクリーニング後)

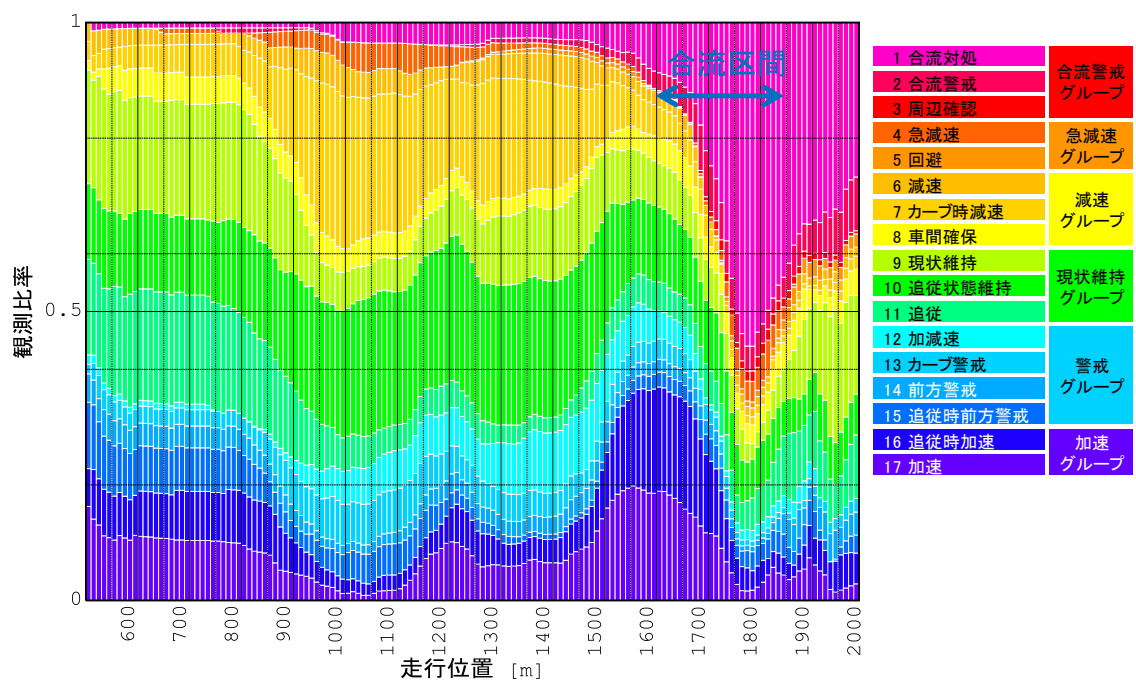


図 6.4 各走行位置における表明意運転意図観測割合
(データクリーニング前)

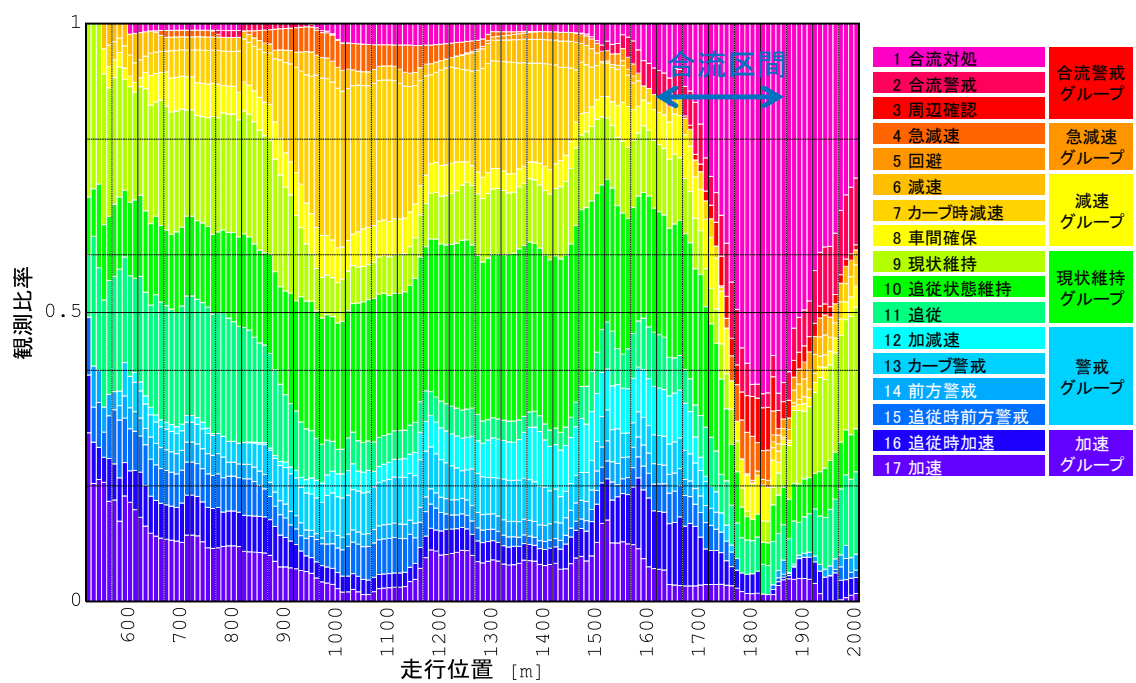


図 6.5 各走行位置における表明意運転意図観測割合
(データクリーニング後)

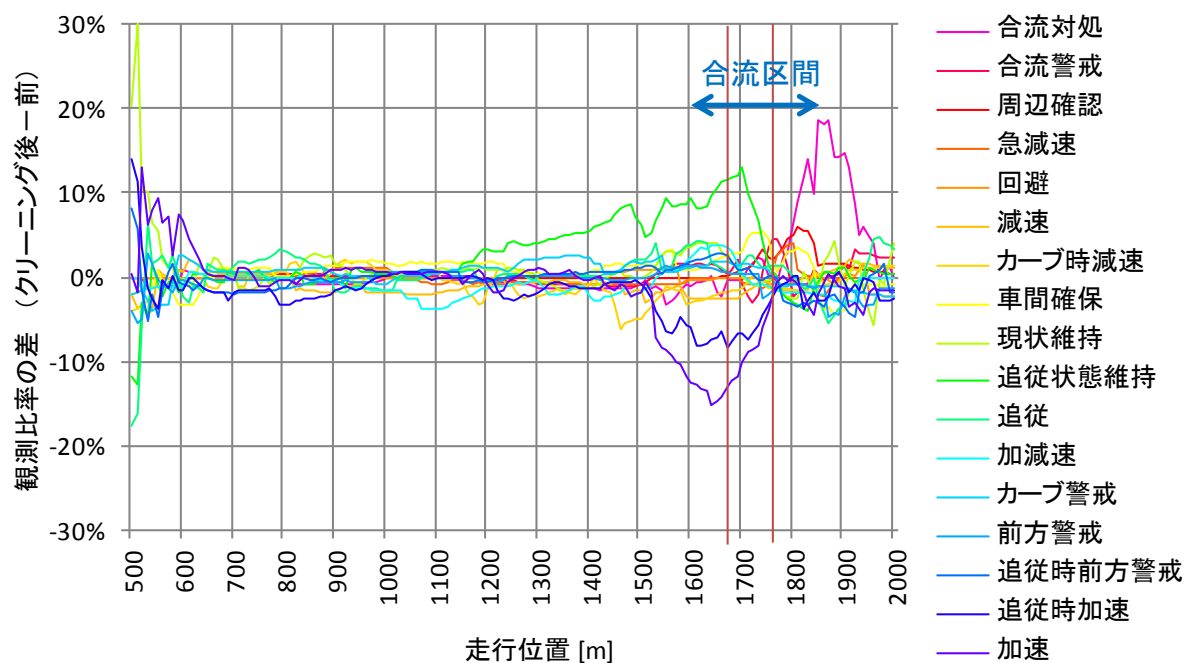


図 6.6 各走行位置における表明意運転意図観測割合の差
(データクリーニング後—前)

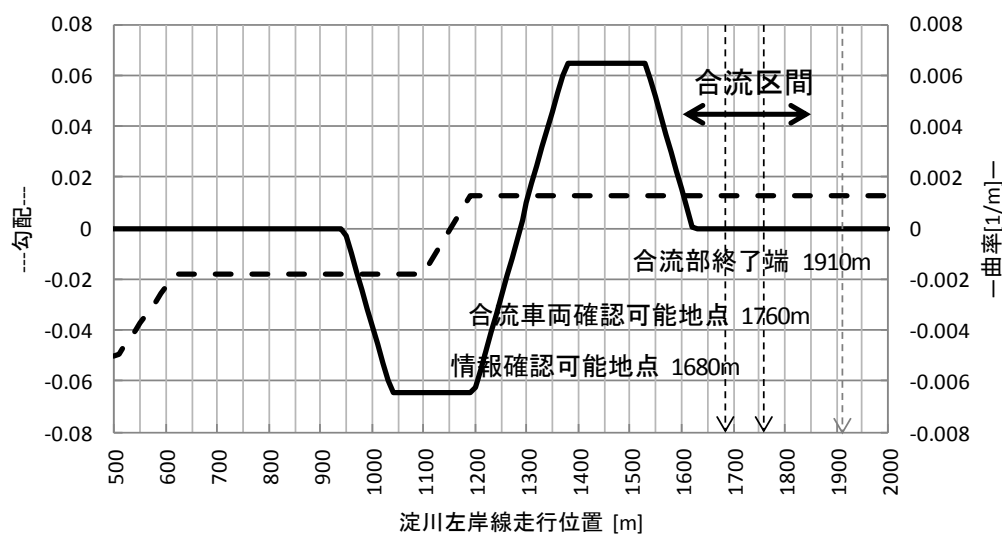


図 6.7 淀川左岸線の道路線形図（再掲）

6.3. 情報提供と表明運転意図推移の関係

6.3.1. 分析区間

本節では、情報提供の種類と表明運転意図推移の関係について分析を行う．分析には第 6.2 節で示したデータクリーニング後のサンプルの合流区間におけるデータを用いる．

6.3.2. 情報提供の種類による相違点

追従型、設置型という 2 つの情報板の種類による観測される表明運転意図の変化の違いについて分析する．なお、第 3 章で述べたように、半数の追従型情報板走行実験では、合流車両の出現位置が異なるため、合流車両が目視できるようになる、1760m 以降は分析の対象外としている．

図 6.8, 図 6.9 にそれぞれ、1 回目、2 回目のインタビューの対象に相当する追従型情報板、設置型情報板点灯時の各表明運転意図の観測数を示し、図 6.10, 図 6.11 にはその観測数の割合を示す．図 6.10, 図 6.11 で情報板の種類に対応する各表明運転意図の割合を比較すると、追従型、設置型ともに、情報提供区間の終端では、半数以上が合流警戒グループに属する表明運転意図が観測されており、情報提供区間において、その割合が増加していることが確認できる．ただし、追従型と設置型では、合流警戒グループの割合が増加する地点が異なっており、追従型では情報提供区間の前半、設置型では情報提供区間の後半となっている．これは、一般的によく知られている張り出した情報提供板である設置型情報板の方が被験者に理解されやすかった可能性を示している．加えて、設置型情報板の走行実験は追従型の後であったため、被験者の走行実験への慣れも影響していると推察される．設置型走行時には、合流区間の開始時点において、既に「車間確保」が多く、「追従状態維持」や「加速」の割合が少ない．これは明らかにその後の合流を意識していることを表しているといえる．

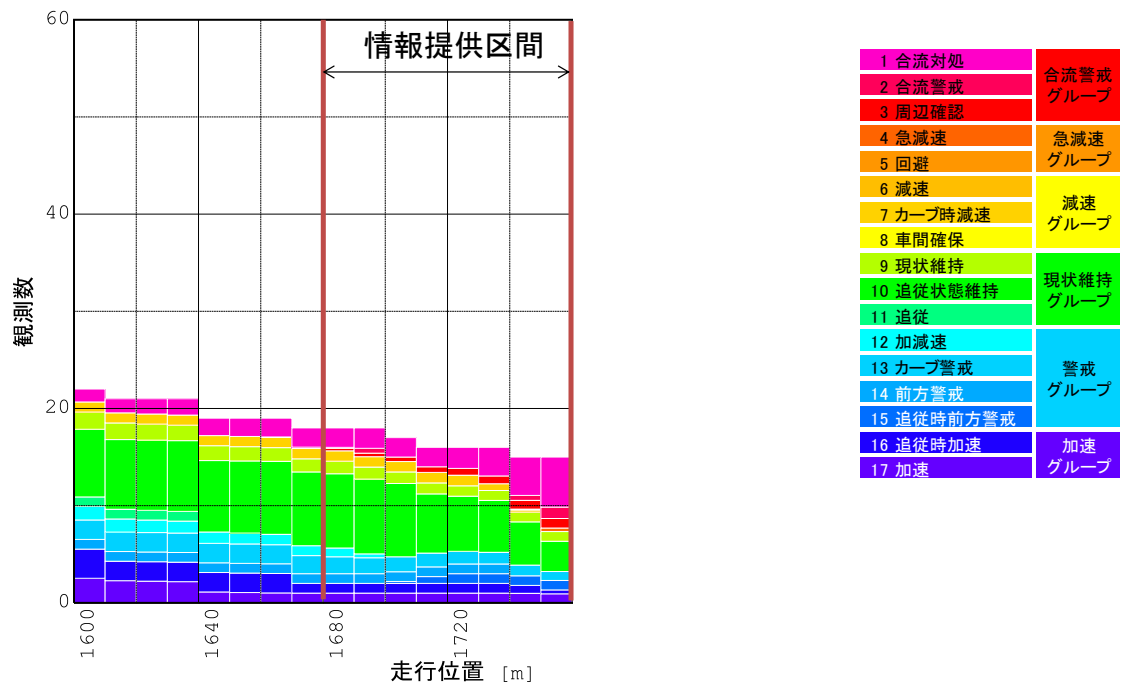


図 6.8 追従型情報板点灯時の各表明運転意図の観測数

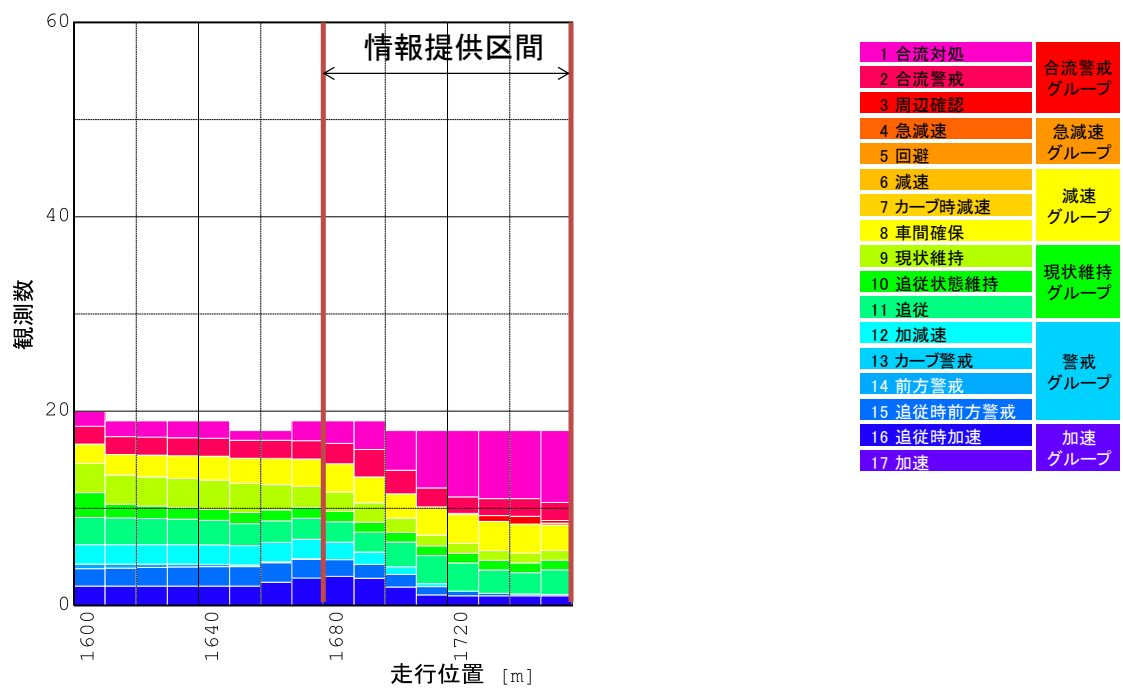


図 6.9 設置型情報板点灯時の各表明運転意図の観測数

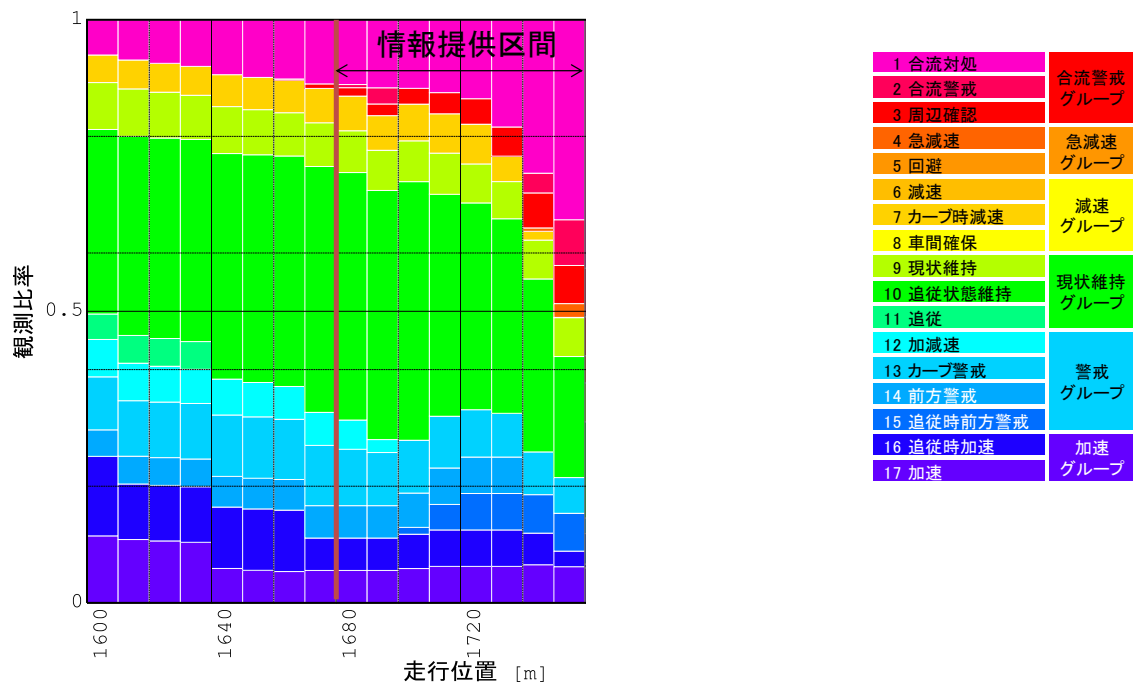


図 6.10 追従型情報板点灯時の各表明運転意図の観測割合

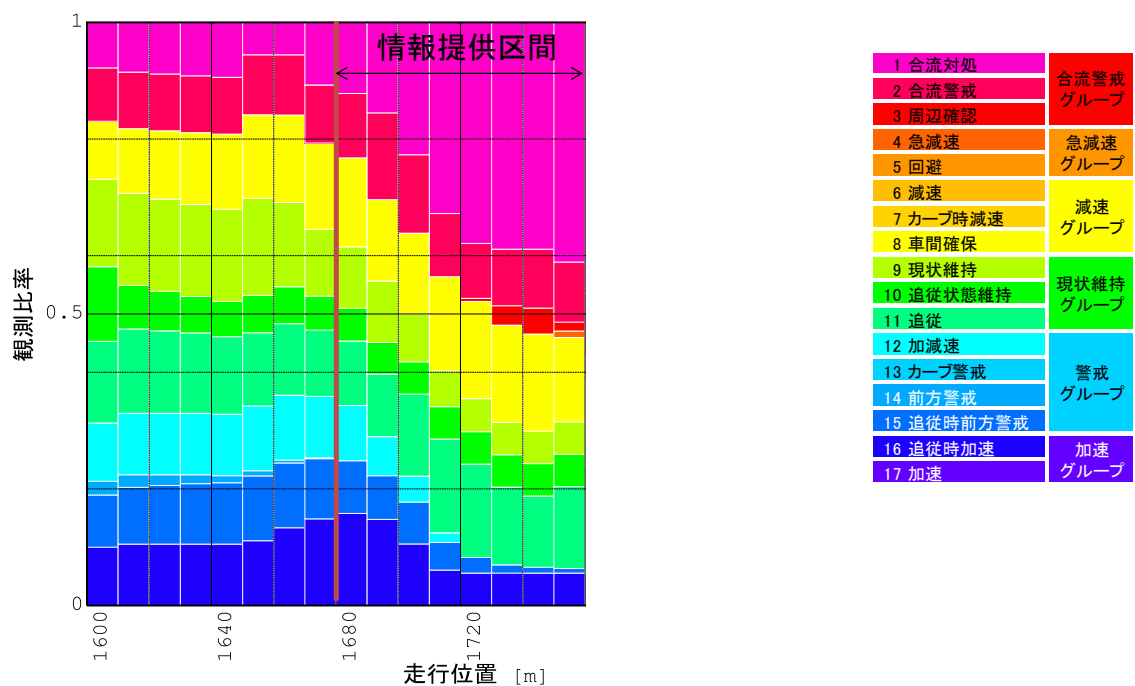


図 6.11 設置型情報板点灯時の各表明運転意図の観測割合

本研究において行ったインタビューに対応する走行実験に関しては、順序効果をはっきりと表れていることがわかった。このことは、表明運転意図を取得しなければ、判断することが困難であったと考えられる。インタビューを行わなかった走行実験として設置型の

後に追従型の情報提供のある走行が含まれているが、どのような順序効果がみられるのかを確認できる意義は大きい。また、情報板の種類もしくは、実験順序の違いによって合流警戒グループへの推移地点に影響が出ることが明らかになった。もし、情報板の種類で結果的な合流挙動に違いが生じるのであれば、この合流警戒グループへの推移地点が影響している可能性を考えるべきである。

6.3.3. 情報提供が適切に行われなかった場合との相違点

次に、追従型情報板が設置されており、合流車両が接近してくるにもかかわらず、情報提供が行われなかった場合（非情報提供時と呼ぶ）と、設置型の場合との表明運転意図の観測数の比較を行う。ただし、追従型情報板の意味を理解していない被験者も存在しており、単純に情報提供のない実験走行とみなすことのできる被験者も含まれていることに留意する。

図 6.12, 図 6.13 にそれぞれ、2 回目, 3 回目のインタビューの対象に相当する、設置型による情報提供時と追従型による非情報提供時の各表明運転意図の観測数を示し, 図 6.14, 図 6.15 にはその観測数の割合を示す。図 6.14 と図 6.15 で各表明運転意図の割合を、設置型による情報提供時と追従型による非情報提供時とで比較すると、追従型による非情報提供時の方がより後の走行実験であったため、情報提供区間では合流警戒グループへ、より早い段階で推移していることがわかる。ただし、合流車両を意識した実際の減速等による対処挙動を示す「合流対処」の割合は非情報提供時の方が少なく、「合流警戒」が多いことがわかる。情報提供区間を過ぎた後の割合をみると、情報提供時はほぼ一定である一方で、非情報提供時は大幅に合流警戒グループ、及び「合流対処」の割合が増加している。これは、設置型点灯時では十分に合流車両に対しての調整が行われていた状態に対して、非情報提供時では合流車両を確認して急に、その合流車両を意識し始めたことを示唆する結果である。言い換えると、非情報提供時における一部の被験者の運転意図は「合流警戒」に移行するものの、結局十分な合流への対処ができないまま合流部で危険にさらされていることが示唆されている。これは、被験者の合流に対する意識を十分に高めない合流部における運転支援情報提供が効果をなさない可能性を示すものである。

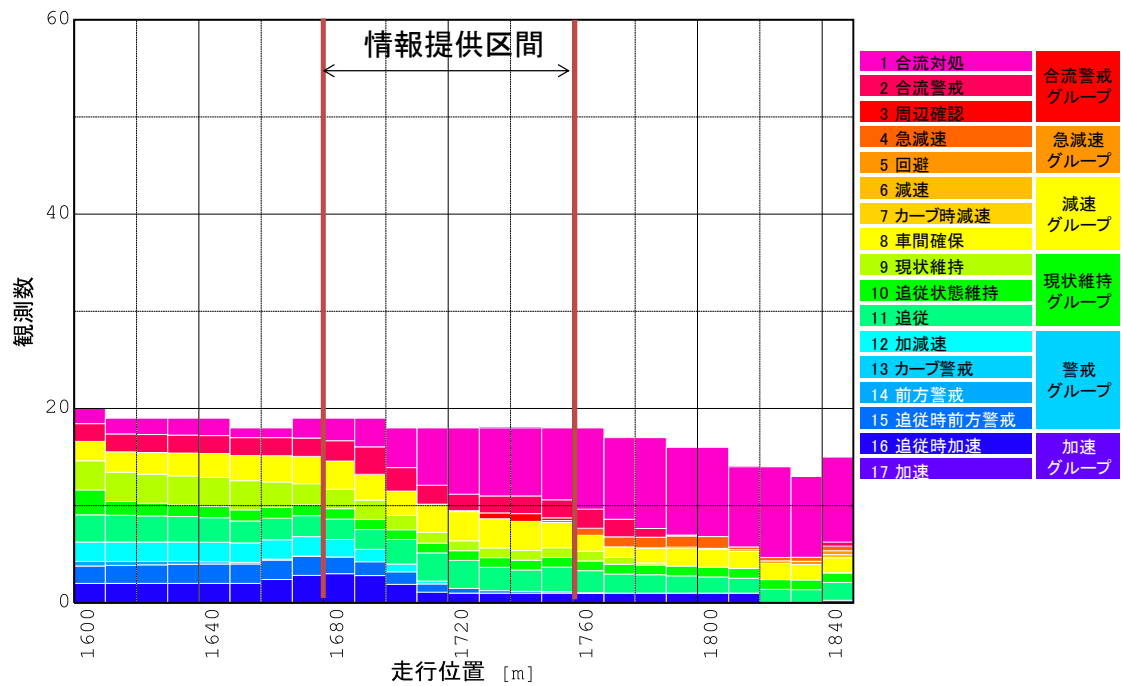


図 6.12 設置型による情報提供時の各表明運転意図の観測数

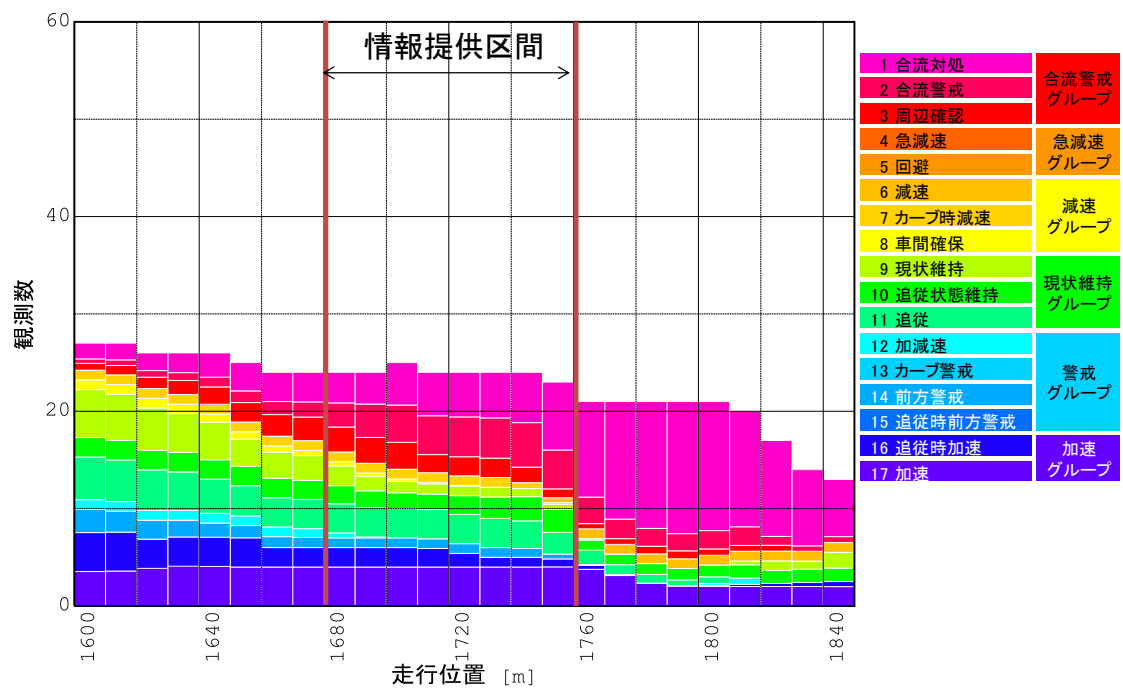


図 6.13 追従型による非情報提供時の各表明運転意図の観測数

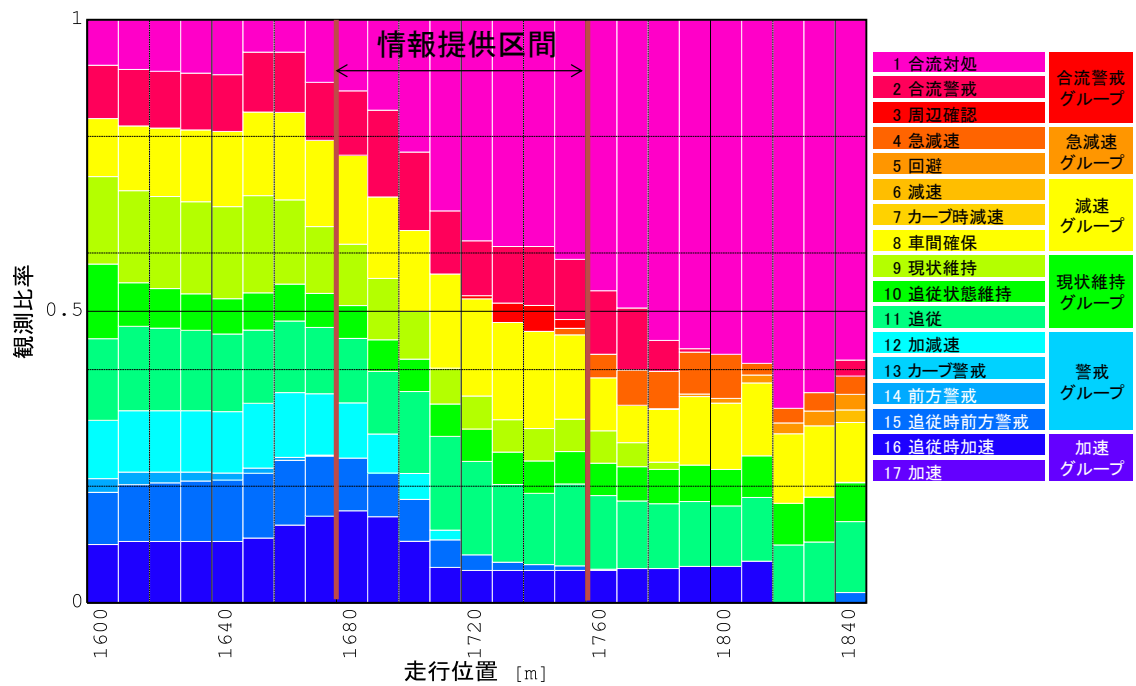


図 6.14 設置型による情報提供時の各表明運転意図の観測割合

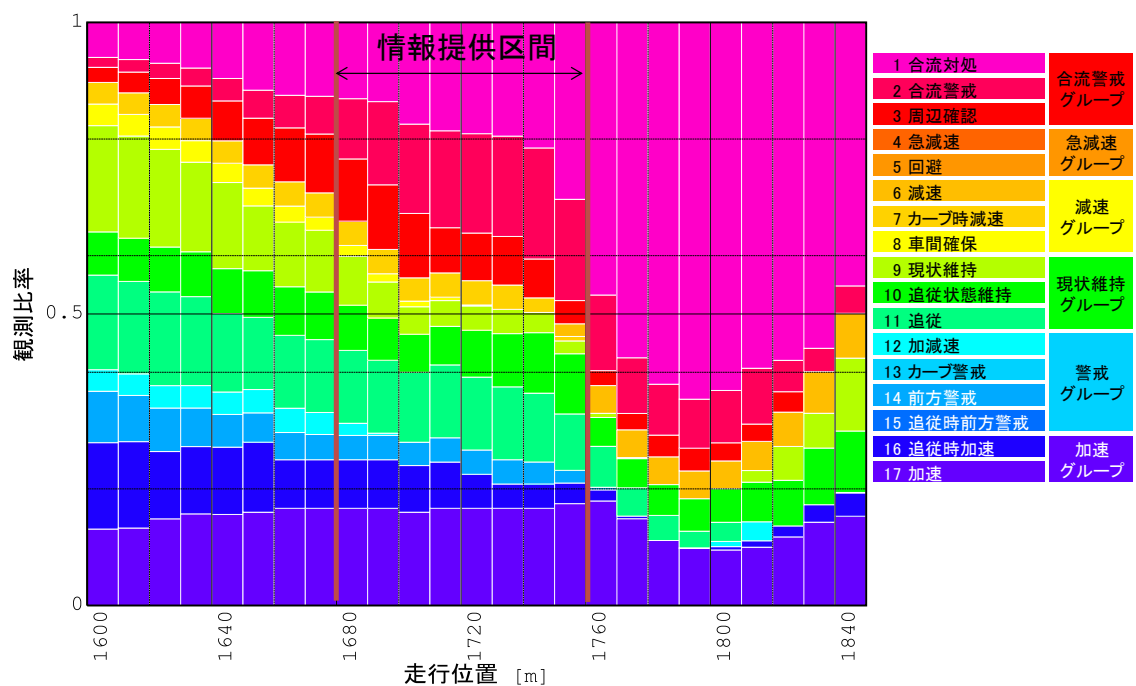


図 6.15 追従型による非情報提供時の各表明運転意図の観測割合

6.4. 表明運転意図推移と車両挙動との関係

6.4.1. 表明運転意図推移地点別にみた車両挙動

前節の分析の結果より、情報板の種類や事前の知識・経験は、合流車両を意識し始める位置に影響を及ぼすことが示された。表明運転意図の変化に即して言い換えれば、合流警戒グループへの推移位置が情報板の種類やその有無によって前後しているといえる。

結果的な車両挙動に関して、上述した合流警戒グループへの推移位置が上流にあるほど、余裕を持った合流車両への対処が可能になり、安全性が向上すると考えられる。そこで本節では、合流警戒グループへの推移位置と結果的な車両挙動の安全性との関係について分析を加える。

まず、具体的にどのような挙動が観測されたかについての例として、図 6.16 に情報提供区間後半で合流警戒グループへの推移した、とある被験者の速度推移を示す。当該被験者は、情報提供区間後半で合流警戒グループへの推移しているが、その後、合流車両を確認したと考えられる地点において、急制動をかけている。本実験では後方車両が存在しないという条件のもと走行実験を行っているが、後方車両等が複数存在した場合、このような急制動は後方からの追突事故等を引き起こす可能性を高くする。よって、本研究では図 6.16 のような急制動が観測される場合に着目した分析を行う。なお、本節の分析においては、追従型点灯時における合流車両の出現位置が他の実験条件と異なる実験時のサンプルを除外している。また、第 6.2 節で示したデータクリーニングを行うと、合流区間全体を通しての走行挙動を把握できるサンプル数が極端に限られてしまうため、データクリーニング前のサンプルを分析に用いている。よって、各被験者の各走行実験を合わせた合計のサンプル数は追従型 29、設置型 57、情報無 57 の全 143 サンプルである。

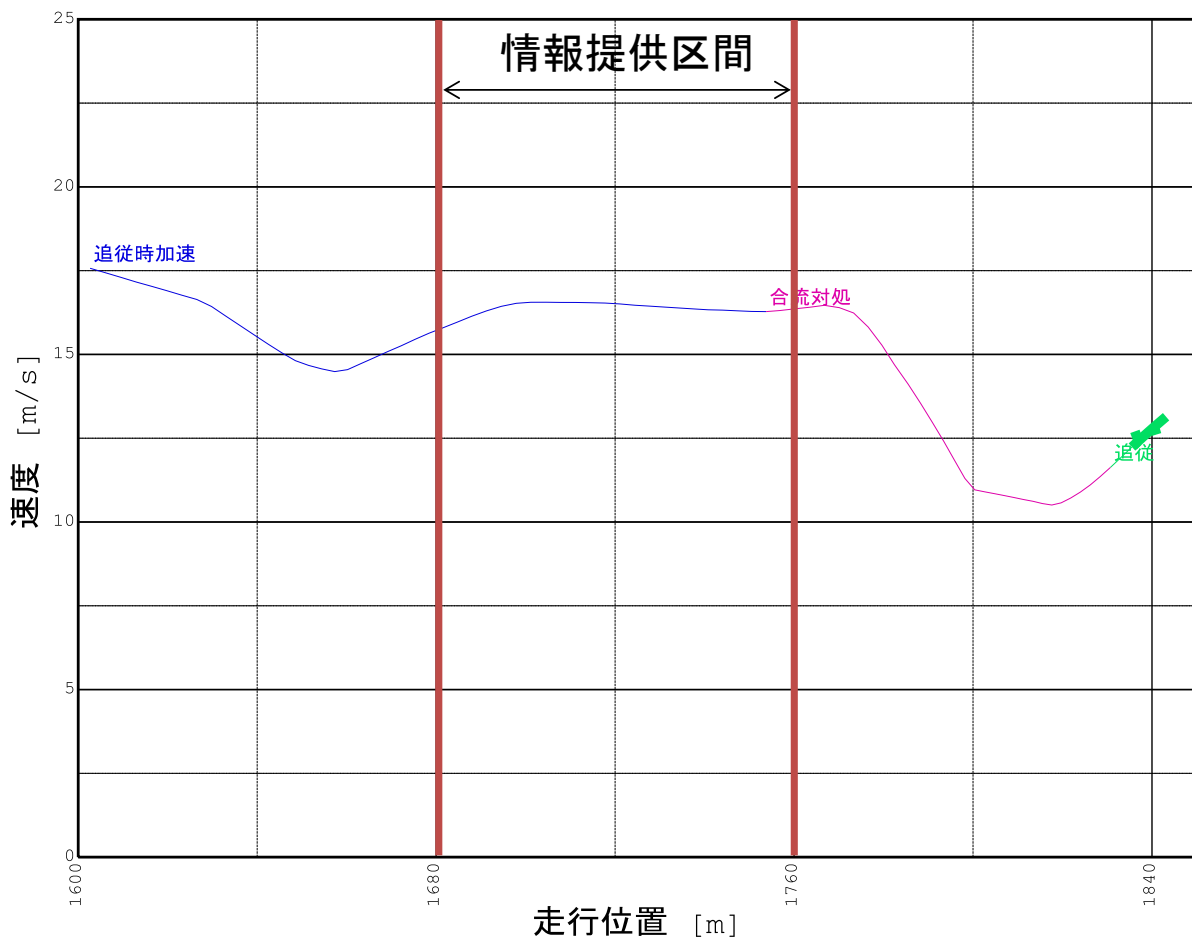


図 6.16 設置型情報板点灯時の速度変化と表明運転意図推移の例

表 6.1 に合流警戒グループへの推移位置と車両挙動を表す各指標との対応を示す．表 6.1 では全サンプルを，図 6.17 に示す合流車両が被験者車両の前方と後方のどちらに進入したかという 2 つの合流状況に場合分けしている．被験者車両の速度が遅く，合流車両が被験者車両の前方へ進入できるよう，被験者車両が合流車両の後方へ入るように被験者が譲渡する場合を表の上段に示した．また，被験者車両の速度が速く，被験者車両が合流車両の後方へ入るように合流車両を追い越した場合を，表の中断に示し，全体のサンプルについて，表の下段に示した．さらに，合流警戒グループへの推移位置でサンプルを場合分けしている．合流警戒グループへの推移位置が変化無であるサンプルは情報提供区間において，合流警戒グループの表明運転意図を持たなかった場合を示している．情報提供区間以前は，1680m 地点以前から合流警戒グループである場合，情報提供区間前半，情報提供区間後半はそれぞれ，1680m～1720m，1720m～1780m の区間において合流警戒グループへ推移したサンプルを示している．加えて，合流区間における最大減速度と，情報提供区間における速度変化，の各走行における値の平均を示す．なお，最大減速度 2 秒間で平均した加速度の最小値であり，速度変化は情報提供区間の始端と終端の速度差の値である．

表 6.1 合流警戒グループへの表明運転意図推移位置別の車両挙動

合流状況	合流警戒グループへの推移位置	サンプル数	サンプル平均	
			合流部最大減速度 (2秒間平均)[m/s ²]	情報提供区間 速度変化[m/s]
合流車両の 後方へ (譲渡)	変化無	22	-0.91	-0.11
	情報提供区間後半	27	-1.23**	-0.08*
	情報提供区間前半	16	-0.74**	-0.72*
	情報提供区間以前	13	-0.97	0.18
合流車両の 前方へ (追越)	変化無	36	-0.51	0.70
	情報提供区間後半	5	-0.64	0.36
	情報提供区間前半	8	0.54	0.33
	情報提供区間以前	14	-1.10	0.42
サンプル 全体 (区別なし)	変化無	58	-0.66	0.40
	情報提供区間後半	32	-1.14	-0.01-
	情報提供区間前半	24	-0.67	-0.37-
	情報提供区間以前	27	-1.04	0.30
	合計	143	-0.83	0.15

(平均値の差の t 検定結果：有意確率 - $P \geq 10\%$, * $P < 10\%$, ** $P < 5\%$)

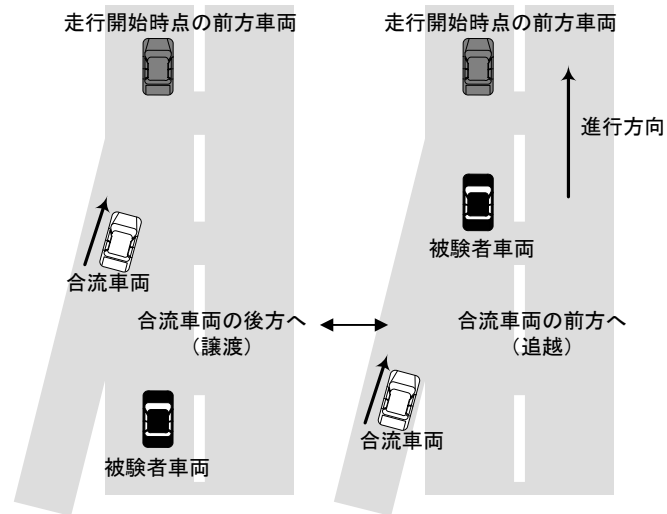


図 6.17 2つの合流状況

ここでは、表 6.1 の太字の部分に着目する．被験者が追い越しをする場合の半数以上の 36 サンプルでは、合流警戒グループへの推移が起こらないことがわかる．この場合の情報提供区間における速度変化をみると、わずかに加速する傾向があり、その結果、合流車両の追い越しにつながったものと考えられる．また、合流車両の後方へ被験者車両が付いた場合に着目すると、情報提供区間前半で合流警戒グループへ推移した場合よりも、後半で推移した場合の方が、情報提供区間において大きく減速する傾向にあり、統計的にもその

傾向が示唆されている。そして、後半で推移した場合の方が、統計的に有意に合流部において大きな減速度を示す結果となっている。よって、合流警戒グループへの早めの推移は、情報提供区間における速度調整を促し、大きな減速度の回避につながっている可能性を示すことができた。また、合流状況に関わらず、合流警戒グループへ情報提供区間の前半で推移した方が、後半で推移した場合よりも、情報提供区間においてより大きく減速する傾向が平均値を比較することで読み取れる。ただし、値のばらつきが大きいため、統計的に有意な差を示さなかった。

表明運転意図に関する情報がない場合、すなわち、合流警戒グループへの推移位置に関する情報がない場合を想定した分析においては、実験条件によって場合分けを行うことが想定される。その結果、表 6.2 に示すような情報が得られ、統計的に有意な傾向を抽出することが困難となる。情報提供区間における速度変化に関しては追従型と設置型で有意な差がみられたが、実験順序に関する影響を無視できない為、情報板の影響を抽出しているとは言い難い。よって、表明運転意図を考慮した分析の方が、情報提供の影響の出かたの把握が容易であったといえる。

表 6.2 合流警戒グループへの情報板の種類別の車両挙動

合流状況	情報提供	サンプル数	サンプル平均	
			合流部最大減速度 (2秒間平均)[m/s ²]	情報提供区間 速度変化[m/s]
合流車両の 後方へ (譲渡)	追従型	16	-0.71	0.63
	設置型	36	-0.98	-0.52
	情報無	26	-1.20	-0.20
合流車両の 前方へ (追越)	追従型	13	-0.61	0.30
	設置型	21	-0.56	0.69
	情報無	31	-0.69	0.59
区別なし	追従型	29	-0.66	0.48
	設置型	57	-0.83	-0.08
	情報無	57	-0.92	0.22
	合計	143	-0.83	0.15

(平均値の差の t 検定結果：有意確率 - $P \geq 10\%$, * $P < 10\%$, ** $P < 5\%$)

6.4.2. 表明運転意図推移地点と情報提供下の速度変化

第 6.4.1 項で示した結果に関して、表 6.1 からは、合流状況に関わらず、合流警戒グループへ情報提供区間の前半で推移した方が、後半で推移した場合よりも、情報提供区間においてより大きく減速する傾向が平均値を比較することで読み取れた。このときの合流警戒グループへの推移位置を横軸に、速度変化値を縦軸にとった図が図 6.18 である。図 6.18 には被験者 ID を合わせて記載しており、本節冒頭で例示した図 6.16 のサンプルには○印

を付けている．合流警戒グループへの推移位置を情報提供区間の前半後半で分けた場合の平均値の差では統計的に有意な差がみられなかったが，合流警戒グループへの推移位置および，情報提供区間における速度変化という 2 つの値の間には統計的に有意な相関が確認された．また，図 6.18 からは，情報提供区間の前半における推移に関しては，警戒グループからの推移が多く含まれる一方で，後半では現状維持グループからの推移が多く含まれていることも読み取れ，現状維持グループの状態は警戒グループに比べて合流への警戒が薄かった可能性を示している．

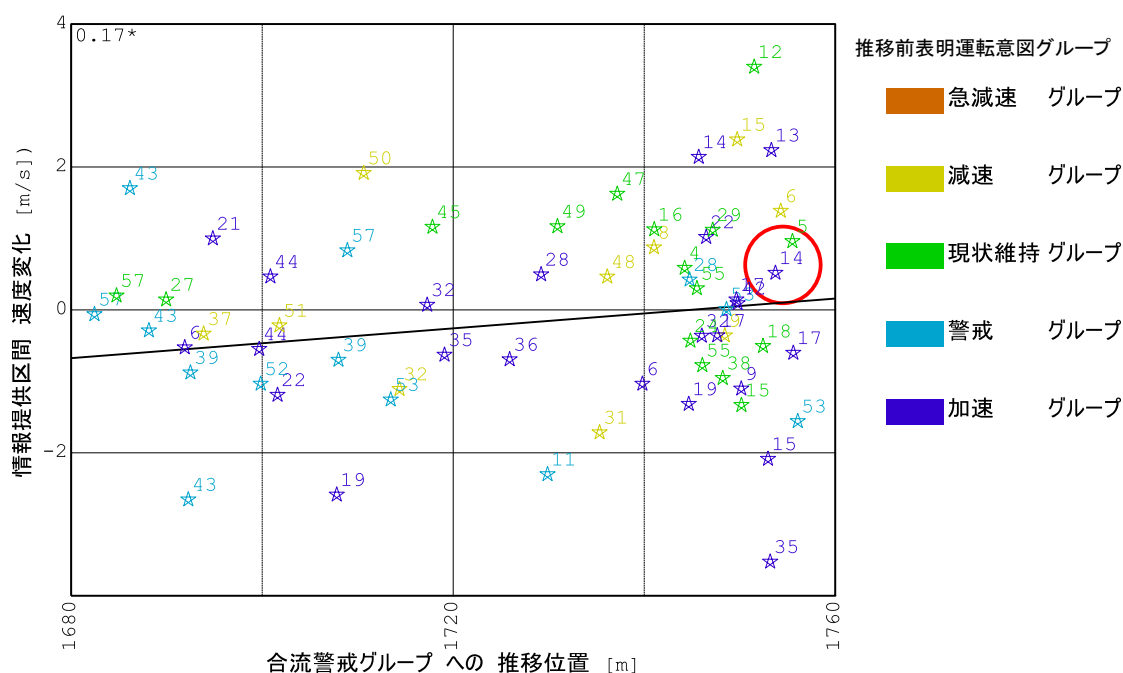


図 6.18 合流警戒グループへの表明運転意図変化位置と情報提供区間における速度変化

6.4.3. 表明運転意図推移地点と合流時の最大減速度

第 6.4.1 項では，情報提供区間前半で合流警戒グループへ推移した場合よりも，後半で推移した場合の方が，情報提供区間において大きく減速する傾向があることを示した．このときの合流警戒グループへの推移位置を横軸に，最大減速度を縦軸にとった図が図 6.19，図 6.20 であり，情報提供を行った場合と，適切に行われなかった場合とで図を分けている．図より，情報提供がなかった場合の最大減速度には，情報提供していた場合よりも大きなものが含まれており，合流警戒グループへの推移位置も情報提供区間の後半に集中していることが読み取れる．この結果を踏まえると，情報提供が適切に行われなことで合流への対処が大きく遅れることが分かる．また，図 6.19，図 6.20 双方から，明らかに情報提供区間の後半で合流警戒グループへの推移が起こった場合の方が大きな減速がみられるため，情報提供区間内でより早く合流警戒グループへの推移を起こせば更なる危険な挙動の抑止

につながるものと考えられる。ただし、表 6.1 より、情報提供区間以前から合流警戒グループにあったサンプルには、情報提供区間前半で合流警戒グループに変化したサンプルよりも大きな減速度がみられ、早すぎる合流警戒グループへの推移は効果がないことが示唆される。

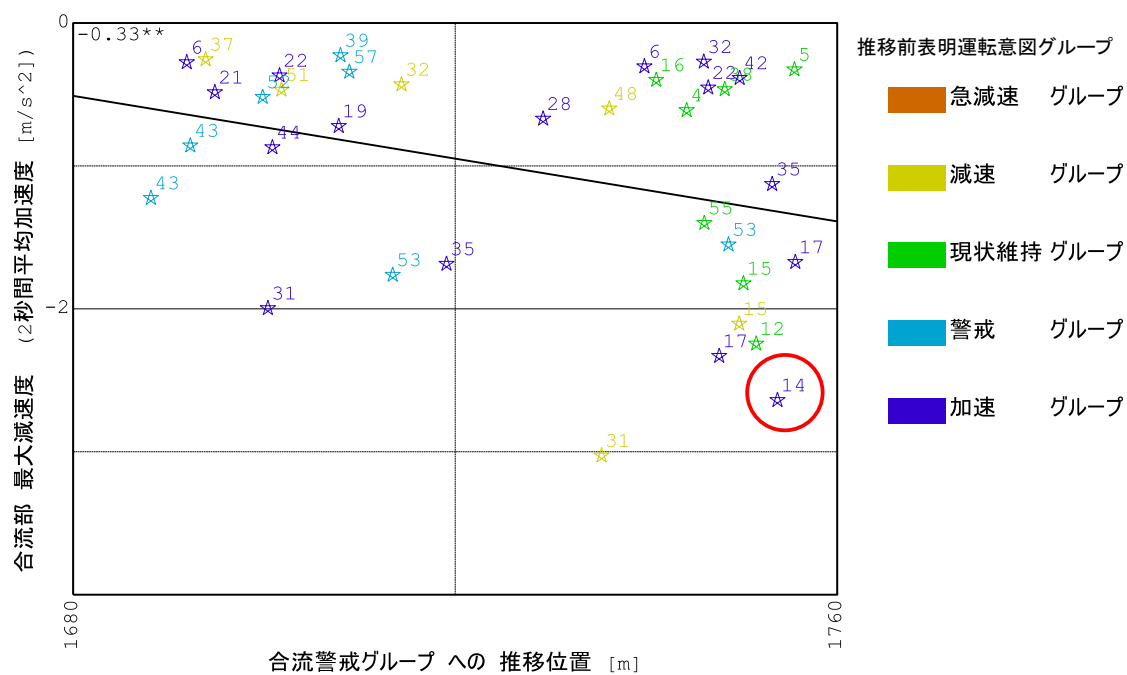


図 6.19 合流警戒グループへの表明運転意図推移位置と合流部における最大減速度
(情報提供を行った場合)

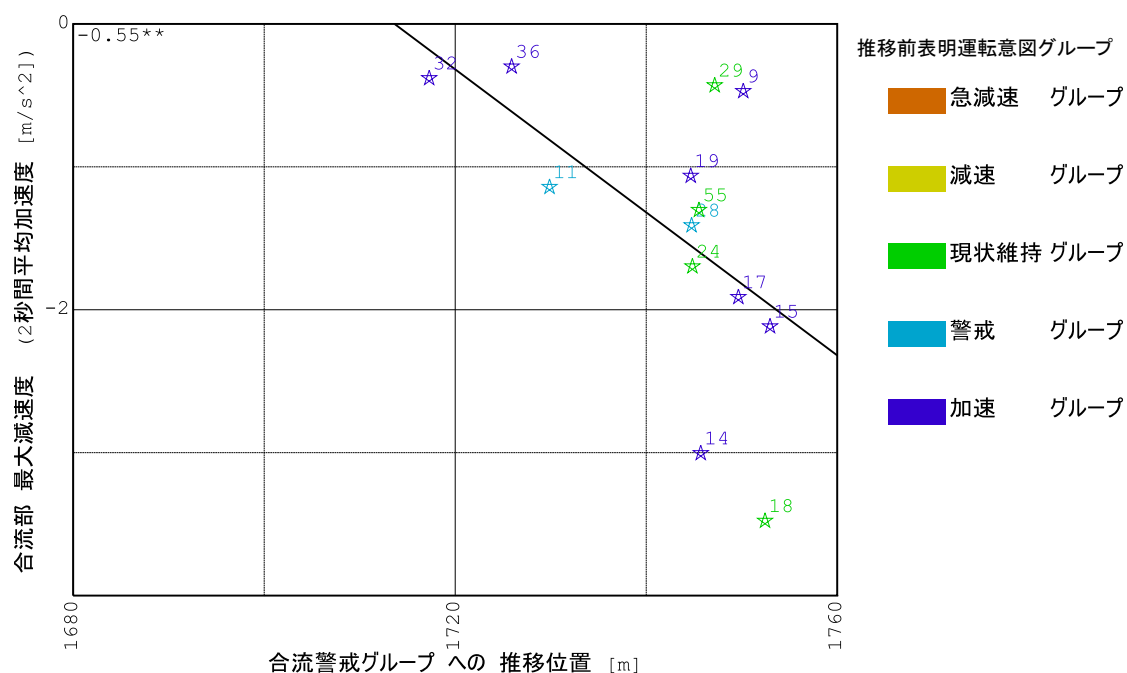


図 6.20 合流警戒グループへの表明運転意図変化位置と合流部における最大減速度
(情報提供が適切に行われなかった場合)

6.5. 情報提供ダミー変数を導入した運転意図推移統合型車両挙動モデル

6.5.1. モデルの概要

本節では、第 3 章で提案した運転意図推移統合型車両挙動モデルを、DS 走行実験時の車両走行データに当てはめ、パラメータ推定を行うことで、運転意図推移統合型車両挙動モデルの運転意図を考慮した車両挙動解析への応用可能性について確認する。パラメータ推定に利用するデータは、第 6.2 節において示した、データクリーニング後の追従型点灯時と設置型点灯時の車両走行データである。

また、本節で構築する運転意図推移統合型車両挙動モデルには、情報提供効果を表す複数のダミー変数を導入し、新たな図 6.21 で示す運転意図推移構造を与える。この運転意図推移構造は通常走行を中心に追従走行、注意走行の推定運転意図をとる構造である。そして、ダミー変数の種類によって 2 パターンの運転意図推移統合型車両挙動モデルを構築し、それぞれに対してパラメータ推定を試みる。導入するダミー変数は、1680m～1760m の情報提供区間において 1、それ以外の地点では 0 となる情報板視認可能ダミー変数と、インタビュー回答において、情報板を見ていたと答えた区間において 1、それ以外の区間において 0 となる情報板認識ダミーの 2 種類である。パターン A のモデルでは、この内、情報板視認可能ダミー変数のみを用いており、情報板が追従型であるか、設置型であるかによ

って2つのダミー変数に分けている．このパターン A のモデルは外部観測可能な説明変数のみで構築されており，インタビュー等による付加的な情報が得られない場合の推定を想定している．一方，パターン B のモデルには情報板視認可能ダミー変数と，情報板認識ダミー変数の，同じく2つのダミー変数を導入する．パターン B のモデルでは外部観測可能な説明変数に加え，運転意図に直接働きかける説明変数が取得可能になった場合の推定結果を確認する．

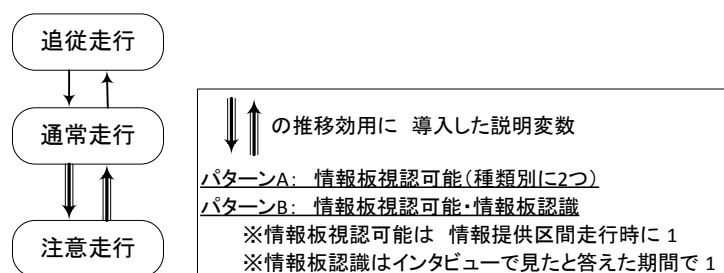


図 6.21 運転意図推移構造

6.5.2. モデルパラメータ推定結果

モデルは第3章で示した尤度関数を最大化することによって，パラメータの推定を行う．その時の計算手法は第4章に示した手法と同一の手法を用いる．以降では，パターン A とパターン B のパラメータの推定結果を比較しながら，分析を加えていく．

まず，下位モデルとしての，追従走行，通常走行，注意走行の3つの加速度モデル推定結果に当たる重み付き重回帰結果を，パターン A，パターン B それぞれについて表 6.3，表 6.4 に示す．この結果に関してはパターン間で小さな違いはあるものの，ほとんど同一の結果となっている．よって，パターン A の結果についてのみ言及する．また，推定結果をもとに本研究では3つの推定運転意図に追従走行，通常走行，注意走行の名前を後付している．

表 6.3 パターン A の推定結果（下位モデルの重回帰分析）

推定運転意図 名	R ² Adj	重み合計	遅れ時間 [s]	加速度 [m/s ²]	速度 [m/s]	車間距離 [m]
追従走行	0.265	5759.1	2.3	-0.1±0.5	16.6±2.5	40.1±12.9
通常走行	0.191	21801.0	3.9	0.0±0.4	16.2±1.9	63.4±12.3
注意走行	0.311	653.9	0.0	-0.5±0.7	16.8±2.4	67.1±15.0

推定運転意図 パラメータ	追従走行			通常走行			注意走行		
	t値			t値			t値		
対象車両速度	-9.1E-03	-6.18	***	-5.2E-02	-49.70	***	-5.0E-02	-8.53	***
直前方車両相対速度	1.6E-01	75.92	***	6.5E-02	48.33	***	9.8E-02	15.63	***
直前方車両相対距離	-3.3E-04	-3.83	***	-6.4E-04	-6.98	***	5.3E-03	18.84	***
合流車両相対速度	1.2E-03	8.62	***	2.0E-03	2.09	**	1.8E-03	24.10	***
合流車両相対距離	-3.6E-02	-18.16	***	-8.3E-03	-1.30	*	-3.0E-01	-57.84	***
合流車両非存在ダミー	-1.3E-01	-12.52	***	-4.4E-02	-1.41	*	7.0E-01	42.61	***
定数	2.1E-01	7.05	***	9.0E-01	24.52	***	-2.6E-01	-2.54	***

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

表 6.4 パターン B の推定結果（下位モデルの重回帰分析）

推定運転意図 名	R ² Adj	重み合計	遅れ時間[s]	加速度 [m/s ²]	速度 [m/s]	車間距離 [m]
追従走行	0.269	5715.0	2.3	-0.1±0.5	16.6±2.5	40.2±13.0
通常走行	0.190	21808.8	3.9	0.0±0.4	16.2±1.9	63.4±12.4
注意走行	0.357	690.2	0.0	-0.5±0.7	16.8±2.4	66.5±15.5

推定運転意図 パラメータ	追従走行			通常走行			注意走行		
	t値			t値			t値		
対象車両速度	-1.0E-02	-6.97	***	-5.2E-02	-49.54	***	-5.6E-02	-10.30	***
直前方車両相対速度	1.6E-01	76.34	***	6.5E-02	48.68	***	8.8E-02	14.80	***
直前方車両相対距離	-3.5E-04	-4.03	***	-6.2E-04	-6.82	***	5.3E-03	19.30	***
合流車両相対速度	1.1E-03	7.81	***	1.9E-03	1.94	**	1.9E-03	25.87	***
合流車両相対距離	-3.5E-02	-17.71	***	-9.8E-03	-1.54	*	-2.9E-01	-61.84	***
合流車両非存在ダミー	-1.3E-01	-12.43	***	-4.1E-02	-1.33	*	8.0E-01	57.17	***
定数	2.3E-01	7.65	***	8.9E-01	24.33	***	-1.5E-01	-1.59	*

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

表 6.3 に示した重回帰の結果の内、まず、適合度に注目すると、追従走行と注意走行の結果が 0.265, 0.311 と高く、通常走行の適合度は他の 2 つと比較すると低い。通常走行の重みが追従走行と注意走行よりも大きいことを考慮すると、追従走行と注意走行は、特定の運転意図に対応する推定運転意図として推定されたのに対して、通常走行の中には分離しきれていない運転意図が複数存在していると考えられる。

追従走行の遅れ時間は 2.3 秒となり、追従モデルとしては少し長い値を示していることがわかる。また、追従走行時の車間距離は 40m 前後と、他の 2 つと比べて小さく前方車両を無視できない状況にあるといえる。一方、注意走行時は合流車両と前方車両が別の車両であり、前方車両よりも合流車両に対応した走行であると考えられる。また、前方車両との相対速度に対するパラメータは、追従走行>通常走行>注意走行の順に大きく、前方車

両への感度は追従走行において高く、注意走行において感度は低い。また、合流車両との相対距離に対するパラメータの絶対値は注意走行＞追従走行＞通常走行の順に大きい。よって、注意走行には、特に合流車両を意識した走行が含まれていると推察される。反対に通常走行では合流車両を意識した走行がほとんど含まれていないと考えられる。この合流車両との相対距離に対するパラメータはいずれも負であることから、当該パラメータは、合流車両がより前方にいれば自分は減速し、合流車両がより後方にいれば自分は加速することによって、円滑な合流を行う様子を表しているものと推察される。

次に、運転意図推移における効用関数のパラメータに関して、パターン A、パターン B それぞれに対しての推定結果を表 6.5、表 6.6 に示す。

表 6.5 パターン A の推定結果（運転意図推移効用パラメータ）

推移元→推移先： パラメータ名	標準偏差		t値	
通常走行→追従走行：				
定数	9.4	1.7E-01	56.37	***
直前方車両相対距離	-0.4	6.4E-03	-56.89	***
合流車両相対距離	-29.3	5.3E+01	-0.55	
合流車両非存在ダミー	4.2	7.5E-02	56.43	***
追従走行→通常走行：				
定数	-10.8	1.9E-01	-56.28	***
直前方車両相対距離	0.4	7.0E-03	56.10	***
合流車両相対距離	14.8	2.3E+01	0.64	
合流車両非存在ダミー	-8.4	1.5E-01	-56.26	***
通常走行→注意走行：				
定数	-16.6	6.0E+00	-2.76	***
直前方車両相対距離	-4.1	6.1E-02	-67.61	***
合流車両相対距離	2.5	3.6E-02	67.55	***
合流車両非存在ダミー	-12.5	+∞	0.00	
追従型視認可能ダミー	-3.9	+∞	0.00	
設置型視認可能ダミー	-10.1	+∞	0.00	
注意走行→通常走行：				
定数	-6.3	1.1E-01	-56.68	***
直前方車両相対距離	0.8	1.4E-02	56.78	***
合流車両相対距離	-32.9	8.9E+01	-0.37	
合流車両非存在ダミー	-10.8	1.9E-01	-56.72	***
追従型視認可能ダミー	2.7	+∞	0.00	
設置型視認可能ダミー	-37.5	7.7E+04	0.00	

（有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%）

表 6.6 パターン B の推定結果（運転意図推移効用パラメータ）

推移元→推移先： パラメータ名	標準偏差		t値	
通常走行→追従走行：				
定数	9.0	1.6E-01	56.11	***
直前方車両相対距離	-0.4	7.1E-03	-57.02	***
合流車両相対距離	-37.4	1.1E+01	-3.36	***
合流車両非存在ダミー	5.9	1.1E-01	56.23	***
追従走行→通常走行：				
定数	-6.0	1.1E-01	-56.21	***
直前方車両相対距離	0.2	4.4E-03	56.25	***
合流車両相対距離	10.1	1.8E-01	56.61	***
合流車両非存在ダミー	-7.2	1.3E-01	-56.20	***
通常走行→注意走行：				
定数	-14.6	2.6E-01	-56.57	***
直前方車両相対距離	-1.6	3.1E-02	-52.55	***
合流車両相対距離	1.0	1.9E-02	53.00	***
合流車両非存在ダミー	-9.2	+∞	0.00	
情報板視認可能ダミー	-3.0	1.2E+00	-2.42	***
情報認識ダミー	5.3	1.2E+02	0.05	
注意走行→通常走行：				
定数	-2.4	4.2E-02	-56.61	***
直前方車両相対距離	0.2	3.1E-03	56.50	***
合流車両相対距離	-5.5	+∞	0.00	
合流車両非存在ダミー	-3.4	5.9E-02	-56.63	***
情報板視認可能ダミー	-29.1	1.2E+01	-2.43	***
情報認識ダミー	-88.9	2.6E+01	-3.37	***

(有意確率 * P<10%, ** P<5%, *** P<1%)

運転意図推移における効用関数のパラメータには、情報板に関して、パターン A とパターン B で異なるパラメータが導入されている。表 6.5、表 6.6 の結果より、パターン A とパターン B で新たに導入したダミー変数以外のパラメータの正負はすべて一致していることが確認でき、推移構造がほとんど同じであることがわかる。パラメータの符号をみると、前方車両が遠ざかった場合に通常走行へ推移する傾向がみられる。また、合流車両との相対距離に関しては追従走行<通常走行<注意走行の順に値が大きくなるほど、推移しやすくなるパラメータとして推定されており、想定とな異なる符号となった。これは合流車両の有無が推移構造に与える影響が大きすぎたためであると考えられる。

また、表 6.5、表 6.6 ではパターン B の方が有意なパラメータが多く、最終的な尤度もパターン B の方が大きかったが、パラメータ推定にヒューリスティックを用いているため、推定結果の是非は乱数に依存する。そのため、一概にパターン B の構造の方が優れていると判断することはできない。よって、各モデル内のパラメータに対して比較と分析を加える。

情報板に関するダミー変数のパラメータは通常走行から注意走行に推移する効用関数内で正、注意走行から通常走行に推移する効用関数内で負となる場合に、注意走行を促す影響を持つと考えられる。パターン A に関しては、情報板視認可能ダミー変数のパラメータの正負が注意走行を促す影響を持つものは、注意走行から通常走行に推移する効用関数内における設置型の情報板視認可能ダミーのみであり、それ以外の情報板に関するパラメータは値の絶対値も小さい。このことから、追従型よりも設置型の方が、注意走行を促す効果が強いことが示唆され、表明運転意図を用いた分析の結果とも一致する。

また、パターン B に関しては、通常走行から注意走行に推移する効用関数内における情報板視認可能ダミーのパラメータ以外、注意走行を促す影響を持つ符号を示しており、注意走行から通常走行に推移する効用関数内におけるダミー変数のパラメータに関しては尤度関数に有意な影響を与えている。この結果から、運転意図に直接影響を与えると想定される情報認識ダミー変数の方が、情報板視認可能ダミー変数よりも注意走行を促す影響の表現力があることがわかる。さらに、情報板に関わるダミー変数は通常走行から注意走行への推移を促すよりも、注意走行から通常走行への推移を妨げる場合の影響が大きいことが明らかになった。

上述したように、運転意図推移統合型車両挙動モデルのモデルパラメータの推定結果について考察することで、推定に利用したデータセットがどのような特徴を持つかを、運転意図の推移と関連付けて分析することができるといえる。説明変数に交通対策を表現する変数を用いれば、当該変数が運転意図に与える影響を推定結果から読み取るといったモデルの活用ができる。

6.5.3. 各地点における推定運転意図の取得数

モデルパラメータの推定結果を用いると、時々刻々の各推定運転意図の状態確率が求まる、その状態確率の和を求めることで、図 6.22 のような各地点における推定運転意図の取得数が得られる。この図 6.22 の結果からもパターン間に差異がほとんど存在しないことがわかる。また、注意走行の推定運転意図は情報提供区間の後半から増加し、合流部に集中していることがわかる。さらに、注意走行とは対照的に、合流部と情報提供区間では、追従走行が減少していることがわかる。

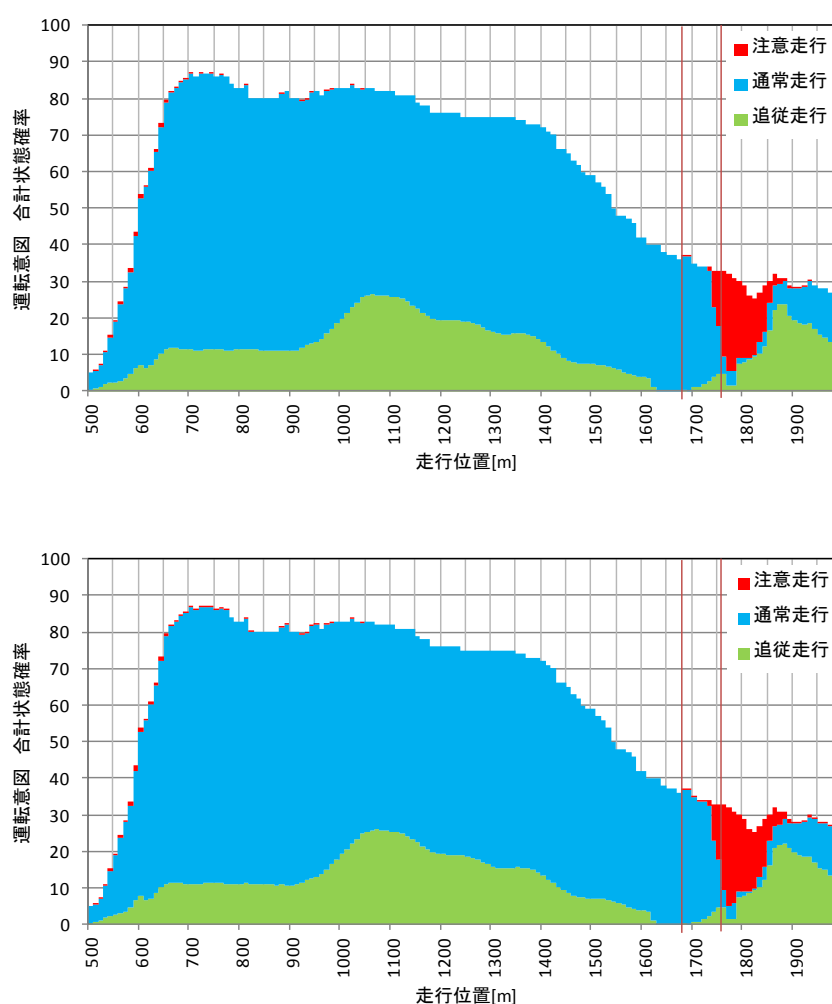


図 6.22 推定運転意図状態確率の合計（上：パターン A 下：パターン B）

各地点における推定運転意図の状態確率の和と、表明運転意図の各地点における総数を比較した図を、図 6.23 に示す。追従走行と「追従状態維持」の総数の変化や、合流部における「合流対処」の最大の割合と、注意走行の最大の割合等、推定運転意図と表明運転意図には類似点が多く、推定運転意図が実際の運転意図と乖離していないことが確認できる。表 6.7 は、各推定運転意図に属する 0.2 秒毎の車両走行プロットの内、何割ずつが各表明運転意図に対応している車両走行プロットであるのかを示している。表より、追従走行は「追従状態維持」が、注意走行には合流警戒グループの表明運転意図が対応しており、通常走行にはそれ以外の表明運転意図が多く含まれることがわかる。運転意図推移統合型車両挙動モデルはあくまで、車両挙動から運転意図を推定しているため、本節における 3 つの運転意図を扱う運転意図推移構造では、多くの運転意図の中から、車両挙動が最も特徴的な 2 つの運転意図を抽出する傾向がある。本節におけるパラメータ推定の結果では、その特徴的な車両挙動を持つ 2 つの運転意図が追従状態を示す追従走行と合流を意識した注

意走行であり，その他の運転意図の集合は通常走行にととまった．本節における，運転意図推移統合型車両挙動モデルに関しても，分析の容易性を考慮し運転意図の推移の表現に相対距離という限定した説明変数を用いている．説明変数と扱う運転意図を増やした推移構造を導入することで，通常走行に分類された運転意図をより細分化できると考えられる．

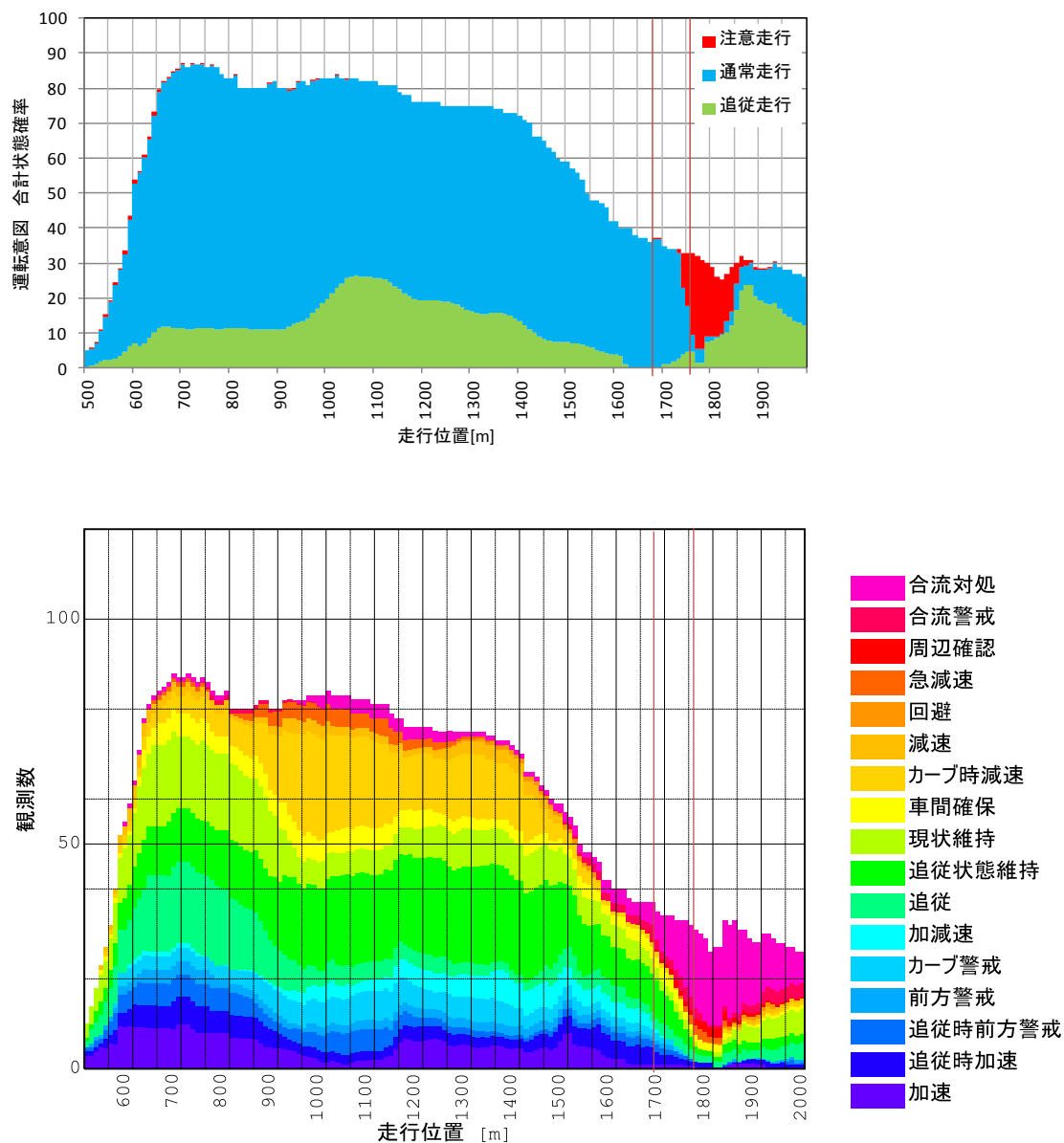


図 6.23 推定運転意図状態確率の合計（上：パターン A）と表明運転意図観測数（下）

表 6.7 パターン A の推定運転意図と表明運転意図の対応

(各表明運転意図に対して最も対応する割合の多い推定運転意図を太字にしている)

推定運転意図 表明運転意図	追従走行	通常走行	注意走行
1 合流対処	11.2%	3.9%	55.7%
2 合流警戒	2.6%	1.1%	5.0%
3 周辺確認	0.7%	0.1%	4.8%
4 急減速	4.3%	1.1%	6.3%
5 回避	0.5%	0.4%	0.0%
6 減速	1.0%	3.1%	0.2%
7 カーブ時減速	10.4%	14.0%	0.7%
8 車間確保	3.7%	5.3%	5.1%
9 現状維持	8.8%	14.2%	3.7%
10 追従状態維持	30.0%	18.3%	3.8%
11 追従	9.7%	9.1%	10.9%
12 加減速	3.1%	4.1%	0.0%
13 カーブ警戒	2.5%	5.7%	0.2%
14 前方警戒	1.2%	3.0%	0.2%
15 追従時前方警戒	1.7%	4.4%	0.3%
16 追従時加速	4.5%	4.7%	2.2%
17 加速	4.1%	7.7%	0.8%
合計	100.0%	100.0%	100.0%

6.6. まとめ

本章では、まず、運転意図を考慮した安全性評価手法を適用した例として、DS 走行実験後の被験者に対して行ったインタビュー調査から取得した表明運転意図を活用して、ONランプ合流部における 2 種類の情報提供板による違いと表明運転意図の推移に着目した情報提供効果の分析を行った。以下に得られた知見を整理する。

- 1) 被験者のよく知る情報板による情報提供を行うと、表明運転意図が早めに合流を意識したものに推移する。
- 2) 合流車両に対応した情報提供が行われない場合には、合流を意識した表明運転意図へ推移したとしても、合流車両に対応した挙動までは誘発されない可能性が示された。
- 3) 早めに合流を意識した表明運転意図に推移させれば、情報提供区間において十分な減速を促すことができ、合流部における急な減速を抑制できる可能性が示された。
- 4) 早めの合流を意識した表明運転意図への推移を誘発できたケースが最も危険性が少なく、情報板による注意喚起にはその注意喚起を促す位置が重要であることが明らかとなった。

上述した結果は、表明運転意図を考慮した分析を行うことによって、一般的な情報板に関する適切な情報提供についての洞察が得られる可能性を示している。これは、表明運転

意図を分析に介在させることで、情報提供がドライバーに与える影響と、その結果として現れる車両挙動の変化を分離して分析することが可能になった為である。本章では、表明運転意図を考慮しない場合と比較することでも、上述した表明運転意図を考慮した時の利点を示した。

一方、表明運転意図の取得にはインタビュー調査が必要となり、常に取得できる情報ではない。そこで、本章では、運転意図の推定が可能な運転意図推移統合型車両挙動モデルを用いた情報提供効果の把握を行った。運転意図推移統合型車両挙動モデルのパラメータ推定を、情報提供効果を示す複数のダミー変数を導入し、情報提供時の走行データを用いて行うことで、情報提供効果を分析した。以下に得られた知見を整理する。

1) 表明運転意図を用いた場合と同様に、設置型の情報提供が、合流を意識した運転を促すことが示唆された。

2) 情報の有無を客観的に表現する説明変数よりも、ドライバーが情報を認識していたかを示す説明変数の方がモデルへの影響が強いことを明らかにした。

3) モデル推定結果より得られる推定運転意図と表明運転意図の間の対応関係について分析を行い、推定運転意図が実際の運転意図と乖離していないことを、第5章に続き再度示した。

4) 運転意図推移統合型車両挙動モデルを活用することでも、情報提供効果に関する追加的な知見を得られる可能性が示された。

しかし、運転意図推移統合型車両挙動モデルを用いて、外部観測による車両挙動データから運転意図を推定し分析に応用するには、運転意図推移統合型車両挙動モデルに関連する知見が未だ少ないといえる。本章で推定した運転意図は、先にその数を3つに限定している影響もあり、表明運転意図と大きく乖離していることはないものの、表明運転意図の内容を十分表現するだけの情報を内包してはいない。推定される運転意図は、車両挙動に依存したものとなるため、現状のモデルでは詳細な運転意図の違いを抽出できない可能性がある。推定される運転意図で、実際の運転意図をどの程度まで表現できるのかを今後確認してゆく必要がある。

7. 結論

7.1. 結論

交通流の円滑性・安全性を向上させる上で、個々の車両挙動を的確に再現する手法、ドライバーの運転意図を考慮した車両挙動の分析手法を構築することは重要な研究課題である。本研究では再現性の高い車両挙動モデルの枠組みの提案と、運転意図を考慮した車両挙動解析を行うための基礎となる分析を行った。

第2章では、既存の車両挙動モデルを複数挙げ、その長短を整理し、その中から、有用なモデル構造を抽出した。続く、第3章では、第2章で挙げた既存のモデルをもとに、新たな運転意図の推移を考慮した統合型車両挙動モデルを構築した。モデル構築にあたり、車両挙動における複数の段階・様相の違いが運転意図に大きく影響されていると仮定しており、統一的な手法によって、運転意図とその推移構造を考慮しつつ、車線変更挙動と様々な加減速挙動を統合したモデルの定式化を行った。加えて、効率的なモデルパラメータの推定方法をも構築した。

第4章では、ビデオ画像から取得した詳細な車両軌跡データを用いて、運転意図推移統合型車両挙動モデルのモデルパラメータの推定を行い、モデルの特徴を明らかにした。その結果、運転意図推移モデルは、追従に関しては、従来の追従モデルよりも大きな加減速がみられる場合の再現性が向上していることを示した。また、車線変更に関して、推定された運転意図の推移も実際の運転意図と乖離していない可能性が示唆された。モデルの持つ統一的な構造によってドライバーの思考過程を考慮しつつ潜在的に異なる車両挙動を分離できる点と、従来の追従モデルでは再現できていなかった大きな加減速を再現した点で、当該モデルは学術的にも、実用性の観点からも価値があるといえる。

第5章では、運転意図と車両挙動との関係の実証的分析を行った。外部観測された車両挙動からは、ドライバーが実際にどのような運転意図をもっていたのかを推測することは可能であっても、その真値を取得することはできない。そのため、DS 運転後のドライバーにインタビューを行い、そのインタビューの回答を複数種類の内容に集約することで表明運転意図の取得を試みた。具体的には DS から得られる車両挙動データと対応づけられるよう DS の時間軸に沿って半構造化インタビューを行い、回答内容を複数のキーワードとして数値化、クラスタリングによって複数の集合に集約して、本研究において表明運転意図と呼ぶ情報の抽出を行った。そして、この表明運転意図が DS より得られた車両挙動に対して整合しているのかについて検証を行った。検証の結果、まず、前方車両が急減速した場合やカーブ区間において、表明運転意図は、その時の状況に対応する形で「現状の維持を示す意図」から「安全運転を意識した意図」に変化をしていることが検証できた。このことから、表明運転意図をドライバーの実際の運転意図とみなすことができることを示した。さらに、各表明運転意図に対応する、速度や前方車両との相対距離等の指標の分

布と運転操作の直接的な結果である加速度との相関関係を検証し、走行状況と運転操作に対して、複数の表明運転意図の間に、相関の有無といった明らかな違いが存在することを見出した。この結果は、複数の運転意図に対応した、それぞれの加減速の運転操作を表現するという運転意図推移統合型車両挙動モデルの構造が、現実に則していることを実証する結果である。加えて、運転意図の推移構造についても検証し、本研究で仮定している運転意図の推移構造に含まれる、特定の運転意図間の推移が顕著にみられることを示した。以上の結果から、運転意図間の推移を表現し、その各運転意図に対応した車両挙動を出力する、運転意図推移統合型車両挙動モデルの構造が実際のドライバーの運転メカニズムと乖離していないことを実証した。表明運転意図の取得を試みた点、車両挙動モデルの構造について運転意図という観点から知見を与えた点に本研究の学術的な特色がある。

第6章では、運転意図に基づいた安全支援情報の提供効果分析を行った。危険性に関する情報提供を行った場合の効果を、車両挙動と合わせて、運転意図までを考慮して分析した例は少ない。本研究では、運転意図と運転意図推移統合型車両挙動モデルを用いた車両挙動解析例として、ドライバーへ情報提供という刺激があった場合の表明運転意図と行動の変化に着目し、安全性を確保するための情報提供板の種類について言及している。具体的には DS 走行実験とその時の表明運転意図を用いて、情報提供板の種類と表明運転意図の関係、表明運転意図と車両挙動の安全性との関係について分析し、情報提供板の種類によって安全を意識する表明運転意図への変化位置が異なること、その変化位置によって車両挙動に顕著な違いが出ることを示した。加えて、情報提供効果を示す複数のダミー変数を導入した運転意図推移統合型車両挙動モデルに DS 走行データを当てはめることで、運転意図推移に影響を与える情報提供効果を示す変数を明らかにした。本研究において、運転意図を考慮することの意義を示し、表明運転意図の推移タイミングと安全性との関係を示したことは、安全性分析に運転意図という情報が利用できることを示唆するものであり、学術的な価値があるといえる。

以上の研究成果は、運転意図という新たな視点を考慮することで、ドライバーの思考と行動メカニズムを深く掘り下げた理解が可能となることを示唆するものである。以降に、本研究における課題と、今後の展望についてまとめる。

7.2. 課題と展望

本研究で構築した運転意図推移統合型車両挙動モデルでは、分析の容易性を考慮したため、運転意図の総数とパラメータ数をあえて少数に厳選した。しかし、表明運転意図の分析結果より、より多くの種類の運転意図を考慮すべきであると考えられる。また、運転意図の推移に対して影響のある変数は、他に多数考えられるため、更なるモデルの改善が見込まれる。また、本研究における DS 実験およびインタビューでは十分に車線変更に関する一連のドライバーの判断過程を捉える事が出来なかった。車線変更を誘発させるような

状況下での表明運転意図取得を行うことで、モデルの精緻化および運転意図に関するより深い知見が得られると考える。

さらに、本研究で行った走行実験は類似した走行挙動が多く含まれていた。実際の道路上では、より多岐にわたった運転意図がみられると考えられる。特に自由な車線変更を許容した走行を本実験では十分行うことができなかった。そのため、車線変更に関する表明運転意図とその推移について未だ十分な知見が得られたとは言い難い。車線変更に関わる運転意図とその推移、そして、車両挙動との関係に関しての知見を得ることが、今後の課題である。

本研究における成果は、運転意図を考慮した車両挙動の解析の多くの利点を示すものであり、運転意図を用いることによって、渋滞や事故の要因となりうるドライバーの思考パターン等の解明とその対策の検討が可能になることが期待される。さらに、本研究で示した運転意図に基づく分析、または、これを発展させた研究を重ねることで、ドライバーの思考と渋滞や事故との関係を明らかにする有用な知見を導くことができると考えられる。